



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

TRABAJO FIN DE GRADO

LARGE EDDY SIMULATION DE FLUJO CONFINADO ENTRE PAREDES

Para la obtención del Grado en Ingeniería Aeroespacial

Presentado por:

Pablo De la Torre Muñoz

Dirigido por:

Pedro Martí Gómez-Aldaraví

Valencia, 27 de junio de 2019

Agradecimientos

Con estas breves líneas, quería agradecer a todos los que han hecho que este trabajo sea posible, desde mis amigos hasta mi familia, pasando por todo el personal de la Universidad Politécnica de Valencia y mi tutor Pedro Martí, del que he aprendido mucho en estos meses y me ha ayudado en todo lo que ha podido.

Por último, dedicar unas líneas a todo mi grupo scout, el cuál me ha servido de apoyo en los momentos de agobio y me ha ayudado a desconectar cuando más lo necesitaba.

Resumen

Los modelos existentes para la simulación CFD son muy variados, por lo que es necesario conocer sus similitudes y discrepancias a la hora de elegir el modelo adecuado para la resolución del problema de interés. Es por ello que el objetivo de este trabajo es la comparación de los resultados obtenidos tras la simulación de un flujo confinado entre paredes con tres modelos *subgrid* de LES, así como la comparación de dos funciones de postproceso para la localización de los vórtices presentes a lo largo de la geometría. Para ello se utiliza el software de código libre OpenFOAM.

Se simulan dos geometrías distintas. La primera de ellas, denominada geometría simple, consiste en un conducto de sección circular por el que circula el fluido, mientras que la segunda de ellas es la misma geometría exterior con la inclusión de un cuerpo de sección transversal cuadrada para la generación de turbulencia en el interior del conducto. Se utilizan los modelos *subgrid* de *Smagorinsky*, *K equation* y *WALE* y las funciones de postproceso *Lambda 2* y *Q - criterion*.

Los resultados obtenidos muestran gran semejanza entre los modelos *Smagorinsky* y *K equation*, mientras que el modelo *WALE* resuelve de una manera más precisa el campo del fluido más cercano a la pared del conducto. Del mismo modo, muestran que no es posible la obtención de estructuras turbulentas sin la presencia de un generador de turbulencia o un obstáculo, como es el caso de la segunda geometría en el que si que se obtienen estructuras turbulentas.

Por último, se obtienen resultados semejantes tras la aplicación de los métodos *Lambda 2* y el *Q - criterion*, por lo que se concluye que ambos métodos son válidos para la localización de las estructuras turbulentas a lo largo del conducto.

Abstract

The existing models for CFD simulation are very assorted, so it is necessary to know its similarities and discrepancies in order to choose the correct model for the resolution of the problem of interest. For this reason, the main objective of this project is the comparison between the results obtained before the simulation of a flux confined between walls with three LES subgrid models, so as the comparison between two different postprocess functions to localize the vortex present in the geometry. In order to do that the free code software OpenFOAM is used.

Two different geometries are simulated. The first of them, called simple geometry, consist in a circular section duct in which a flux travel, whereas the second one is the same exterior geometry with the inclusion of a square section body for the generation of turbulence in the interior of the duct. The subgrid models of *Smagorinsky*, *K equation* and *WALE* and the postprocess functions of *Lambda 2* and *Q – criterion* are used.

The results obtained show a big similarity between *Smagorinsky* and *K equation* models, whereas the *WALE* model solve the flux in the nearest part of the wall of the duct in a more accurate way. It is shown also that it is not possible to get turbulence structures without a generator of turbulence or an obstacle, as it is the case of the second geometry in which turbulence structures are got.

At last, similar results are obtained before the application of the two postprocess functions *Lambda 2* and *Q – criterion*, so it is come to the conclusion that both methods are valid for the location of turbulence structures in the duct.

Resum

Els models existents per a la simulació CFD són molt variats, per la qual cosa és necessari conèixer les seues similituds i discrepàncies a l'hora de triar el model adequat per a la resolució del problema d'interés. És per això que l'objectiu d'este treball és la comparació dels resultats obtinguts després de la simulació d'un flux confinat entre parets amb tres models *subgrid* de LES, així com la comparació de dos funcions de postprocesado per a la localització dels vòrtexs presents al llarg de la geometria. Per a això s'utilitza el software de codi lliure OpenFOAM.

Se simulen dos geometries distintes, la primera d'elles, denominada geometria simple, consistix en un conducte de secció circular pel que circula el fluid, mentres que la segona d'elles és la mateixa geometria exterior amb la inclusió d'un cos de secció transversal quadrada per a la generació de turbulència en l'interior del conducte. S'utilitzen els models *subgrid* de *Smagorinsky*, *K equation* i *WALE* i les funcions de postprocesado *Lambda 2* i *Q - criterion*.

Els resultats obtinguts mostren gran semblança entre els models *Smagorinsky* i *K equation*, mentres que el model *WALE* resol d'una manera més precisa el camp del fluid més pròxim a la paret del conducte. De la mateixa manera, mostren que no és possible l'obtenció d'estructures turbulentes sense la presència d'un generador de turbulència o un obstacle, com és el cas de la segona geometria en què si que s'obtenen estructures turbulentes.

Finalment, s'obtenen resultats semblants després de l'aplicació dels mètodes *Lambda 2* i el *Q - criterion*, per la qual cosa es conclou que ambdós mètodes són vàlids per a la localització de les estructures turbulentes al llarg del conducte.

Índice general

I	MEMORIA	1
1.	Introducción.	3
1.1.	Contexto	3
1.2.	Objetivos y motivación	4
1.3.	Estructura del trabajo	5
2.	Desarrollo teórico.	7
2.1.	Flujo confinado entre paredes	7
2.2.	Flujo alrededor de un cuerpo	12
2.3.	Técnicas para el estudio de la turbulencia	13
3.	Metodología CFD.	15
3.1.	Introducción CFD	15
3.2.	Introducción a OpenFOAM	18
3.2.1.	Estructura general de OpenFOAM	19
3.2.2.	El <i>solver</i>	20
3.3.	Geometría y mallado	23
3.3.1.	Geometría	23
3.3.2.	Mallado	24
3.4.	Condiciones de contorno	28
3.5.	Descripción de los modelos subgrid para LES.	30
3.5.1.	Smagorinsky	30
3.5.2.	One equation eddy-viscosity SGS model (<i>k equation</i>)	33
3.5.3.	WALE	34
3.6.	Postproceso	36
3.6.1.	El método <i>Lambda2</i>	36
3.6.2.	<i>Q-criterion</i>	37
4.	Resultados	39
4.1.	Resultados de la simulaciones	39
4.1.1.	Campos de velocidad	40
4.1.2.	Vorticidad con método <i>Lambda2</i>	44
4.1.3.	Vorticidad con el método <i>Q - criterion</i>	49
4.2.	Velocidad promedio	56
4.2.1.	Velocidad promedio a la salida del conducto	56
4.2.2.	Promedio de velocidades en la estela del cuerpo de sección cuadrada	61

5. Conclusiones	67
5.1. Introducción	67
5.2. Conclusiones	67
5.3. Trabajos futuros	68

II PLIEGO DE CONDICIONES **69**

1. Condiciones generales.	71
1.1. General.	71
1.2. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril.	72
2. Condiciones de especificaciones técnicas.	79
2.1. Especificaciones de materiales y equipos.	79
2.2. Condiciones de calidad.	81
2.3. Condiciones de garantía y mantenimiento.	81
2.4. Reclamaciones.	81
2.5. Condiciones legales y contractuales.	82
2.6. Revisión de los precios.	82
2.7. Fianza.	82
2.8. Aceptación.	82

III PRESUPUESTO **85**

1. Presupuesto	87
1.1. Costes a tener en cuenta	88
1.2. Desglose de costes unitarios	89
1.2.1. Coste de material y software unitario	89
1.2.2. Coste de personal cualificado unitario	90
1.2.3. Coste de oficina unitario	91
1.2.4. Coste de material de oficina	91
1.3. Presupuesto total	91

Índice de figuras

1.1.	Organigrama del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. . . .	4
2.1.	Gradiente de velocidades del flujo confinado entre paredes en regimen laminar y turbulento.	8
2.2.	Evolución de la capa límite laminar en un flujo que atraviesa un conducto. .	9
2.3.	Evolución de la Capa límite a lo largo del conducto.	10
2.4.	Rugosidad absoluta de un conducto de sección circular.	10
2.5.	Evolución de los vórtices generados por un flujo atravesando un cilindro de sección circular con el número de Reynolds.	12
2.6.	Camino de Von Karman.	13
3.1.	Relación entre CFD, experimentación y teoría.	17
3.2.	Estructura general del software OpenFOAM.	19
3.3.	Directorios principales de un caso particular en OpenFOAM.	20
3.4.	Esquema del algoritmo PIMPLE.	22
3.5.	Geometría empleada	23
3.6.	Numeración celda OpenFOAM.	24
3.7.	Mallado de la Geometría 1	25
3.8.	Mallado de la Geometría 2	27
3.9.	Partes de la Geometría de estudio.	29
4.1.	Campo de velocidades en la salida de la Geometría 1	40
4.2.	Campo de velocidades en el eje longitudinal de la Geometría 1	41
4.3.	Campo de velocidades en el eje longitudinal de la Geometría 2	42
4.4.	Campo de velocidades en la salida de la Geometría 2	43
4.5.	Vorticidad en la salida de la Geometría 1 método Lambda 2	44
4.6.	Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 1 método Lambda 2 .	45
4.7.	Vorticidad en 3D de la Geometría 1 método Lambda 2	46
4.8.	Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 2 método Lambda 2 .	47
4.9.	Vorticidad en 3D de la Geometría 2 método Lambda 2	48
4.10.	Vorticidad en la salida de la Geometría 2 método Lambda 2	49
4.11.	Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 1 método Q - criterion	50
4.12.	Vorticidad en 3D de la Geometría 1 método Q - criterion	51
4.13.	Vorticidad en la salida de la Geometría 1 método Q - criterion	52
4.14.	Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 2 método Q - criterion	53
4.15.	Vorticidad en 3D de la Geometría 2 método Q - criterion	54

4.16. Vorticidad en la salida de la Geometría 2 método Q - criterion	55
4.17. Variación del promedio del módulo de la velocidad a lo largo del tiempo a la salida del conducto	57
4.18. Variación del promedio de la velocidad en el eje x a lo largo del tiempo a la salida del conducto	58
4.19. Variación del promedio de la velocidad en el eje y a lo largo del tiempo a la salida del conducto	59
4.20. Variación del promedio de la velocidad en el eje z a lo largo del tiempo a la salida del conducto	60
4.21. Variación del promedio del módulo de la velocidad a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cadrada	62
4.22. Variación del promedio de la velocidad en el eje x a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cadrada	63
4.23. Variación del promedio de la velocidad en el eje y a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cadrada	64
4.24. Variación del promedio de la velocidad en el eje z a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cadrada	65

Índice de tablas

3.1. Características geométricas del problema.	23
3.2. Número de celdas presente en cada geometría.	26
1.1. Presupuesto desglosado.	92
1.2. Presupuesto total con IVA.	93

Parte I

MEMORIA

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Contexto

Este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado como parte de un estudio realizado en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València.

Este departamento es un centro de investigación compuesto por más de 100 personas que compaginan sus tareas docentes con sus labores de investigación. El instituto de investigación Cátedra de Máquinas Térmicas está involucrado en el desarrollo del futuro de los motores de combustión en el ámbito automovilístico así como en el ámbito aeronáutico, debido a la alta relación de este departamento con el Grado en Ingeniería Aeroespacial impartido en la Universitat Politècnica de València.

Por más de 40 años, han conducido su investigación a un mejor entendimiento de los procesos físicos involucrados en las distintas etapas presentes en los motores de combustión interna, aplicando estudios para la optimización del comportamiento del motor y asistiendo en su desarrollo. El centro combina ensayos experimentales con estudios teóricos aportando relevancia técnica y resultados científicos.

El desarrollo de su actividad se divide como se puede ver en su organigrama, expuesto en la Figura 1.1.

En este organigrama se puede observar como de la gestión del centro nacen las distintas ramas en las que este está dividido. La primera de ellas es la rama de administración, desde en la que se organizan las distintas actividades realizadas en el centro. Seguidamente se puede observar la segunda rama en la que podemos destacar el CFD (“Computational Fluid Dynamics”), las instalaciones y el servicio informático del centro. La tercera rama se corresponde con la rama de mantenimiento. Este departamento se encarga de mantener operativos los distintos equipos utilizados en las pruebas experimentales llevadas a cabo en el centro.

Por último se encuentra la rama de termo-fluidodinámica. Esta rama se divide

en cuatro departamentos que se corresponden con distintas áreas de investigación de motores. El primero de ellos centrado en la inyección y en la combustión, el segundo centrado en la gestión del aire, para mejorar la eficiencia y la emisión de contaminantes, el tercero centrado en el control de los ruidos generados para reducir las emisiones y el último de ellos centrado en la gestión de la temperatura para mejorar la eficiencia de los motores.

Este Trabajo de Fin de Grado se encuentra en la línea de investigación de CFD.

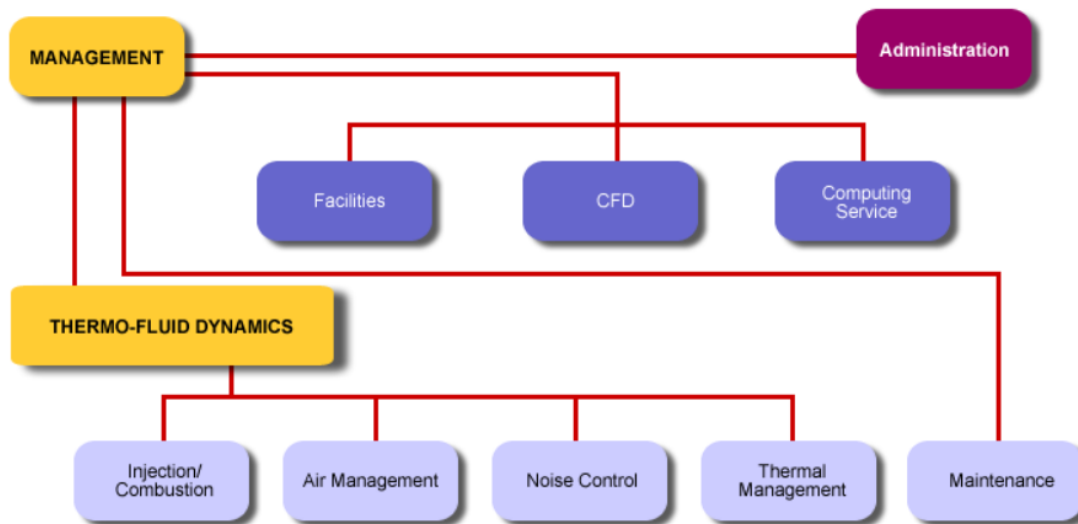


Figura 1.1: Organigrama del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.

El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos realiza investigaciones para distintas empresas tanto nacionales como internacionales, entre las que se pueden destacar algunas muy conocidas como Renault, Aprilia, Ford, General Electric. . . Con ellas realizan estudios para la mejora de la eficiencia de los motores Diesel, gasolina, mixtos e incluso de gas, en los procesos de inyección y combustión para reducir emisiones y consumo.

1.2. Objetivos y motivación

Los modelos existentes para la simulación CFD son muy diversos y utilizan distintas ecuaciones para la modelización del flujo turbulento en las zonas de la capa límite, por lo que es necesario conocer las discrepancias y semejanzas entre ellas para ayudar a utilizar el modelo que más se asemeje a la realidad en cada caso.

Por ello, el objetivo de este trabajo es la simulación de un flujo que pasa a través de un conducto de sección circular, con y sin la presencia de un obstáculo de sección cuadrada en el interior del mismo, con tres tipos de modelos de la turbulencia de grandes escalas para comparar los distintos resultados obtenidos y las diferencias entre ambos. También se utilizarán dos funciones de postproceso para la localización de vórtices

turbulentos a lo largo de las dos geometrías para comparar sus resultados. El estudio de los dos tipos de geometría es interesante debido a la problemática que existe en los conductos ya que sin la presencia de un generador de turbulencia o sin la presencia de una turbulencia inicial, esta se disipa volviéndose el flujo laminar a lo largo de toda la sección longitudinal.

Para la realización de este proyecto se utilizan los siguientes softwares:

- OpenFOAM, que es un servidor libre de cálculo CFD utilizado para la obtención de la velocidad y presión a lo largo del conducto.
- Matlab, que es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje propio. Este software ha sido utilizado para la realización del mallado y la obtención de las condiciones iniciales del problema.
- ParaView, es una aplicación de visualización y análisis de datos multiplataforma de código abierto. Esta ha sido utilizada para el postproceso de la información obtenida del software OpenFOAM.
- MiKTeX console, es un sistema de escritura destinado a la creación de libros y artículos científicos. Este sistema de escritura ha sido utilizado para la escritura de esta memoria.

1.3. Estructura del trabajo

El trabajo se dividirá en los siguientes capítulos, a parte de esta primera introducción:

- Capítulo 2: Desarrollo teórico, en el que se explicará detalladamente la teoría de conductos, así como la teoría LES (Large Eddy Simulation) de simulación de la turbulencia.
- Capítulo 3: Metodología CFD, en este capítulo se incluirá una descripción del software utilizado y una definición de la geometría, mallado y condiciones de contorno utilizadas en las simulaciones
- Capítulo 4: Descripción de los modelos subgrid para LES. En este se explicarán los distintos modelos turbulentos utilizados, enumerando las ecuaciones utilizadas en cada caso y su utilidad.
- Capítulo 5: Resultados, en el que se expondrán los resultados obtenidos. En este capítulo se mostrarán las velocidades y las presiones en distintos instantes de tiempo de las dos geometrías calculadas con los tres modelos subgrid utilizados, relacionando estos con la teoría y comentando su validez.
- Capítulo 6: Conclusiones, en el que se expondrán brevemente las conclusiones obtenidas del trabajo realizado y se propondrán trabajos futuros para continuar con el estudio.

Capítulo 2

Desarrollo teórico.

2.1. Flujo confinado entre paredes

El flujo confinado entre paredes estudia los casos en los que la línea piezométrica está situada en el exterior de la región del fluido. Sus resultados se aplican al estudio, cálculo y diseño de conducciones, accesorios y controles para el manejo de flujos que ocurren por la acción de la mayor energía en la sección inicial de los conductos forzados.

Un efecto importante a tener en cuenta dentro del conducto que afecta a la distribución del flujo es la viscosidad. Se denomina viscosidad al efecto producido por los fluidos en movimiento, debido a la acción combinada de la cohesión intermolecular y el cambio de momento lineal de las capas vecinas de partículas en movimiento.

La viscosidad se manifiesta como una fuerza de fricción entre las capas de partículas en movimiento. Es una propiedad física de los fluidos y varía fundamentalmente con la temperatura de forma distinta para gases y para líquidos.

La cohesión es la fuerza de atracción entre los grupos de moléculas vecinas debida a la atracción de sus masas y a fuerzas electroquímicas entre ellas. Esta fuerza es importante en los líquidos y su magnitud es inversamente proporcional a la temperatura. Esto origina una disminución en la viscosidad con el incremento de la temperatura, al contrario que pasa en los gases.

Si se considera un conducto con una sección circular, como es el caso de la geometría de estudio descrita en el Capítulo 3, se observa como las paredes afectan al desarrollo del flujo a lo largo de toda la sección longitudinal. El flujo que se encuentra en contacto con las paredes del conducto toma velocidad nula, y las partículas del fluido que se encuentran cercanas a estas adquieren un gradiente de velocidades que varían desde cero hasta la velocidad máxima presente en la zona central del conducto. A este efecto se le denomina condición de no deslizamiento y es debida a los efectos viscosos. Este efecto puede verse en la Figura 2.1.

En esta imagen (Figura 2.1) también se puede observar como el perfil de velocidades

varía dependiendo del régimen en el que se encuentre el flujo que atraviesa el conducto. En el caso de presentarse un flujo laminar, el gradiente de velocidades es menor, produciéndose su máximo en el eje del conducto, mientras que si el flujo se encuentra en régimen turbulento, esta gradiente es mayor, apareciendo un perfil de velocidades más constante en la parte central del conducto, siendo menor la parte del flujo afectada por la presencia de la pared.

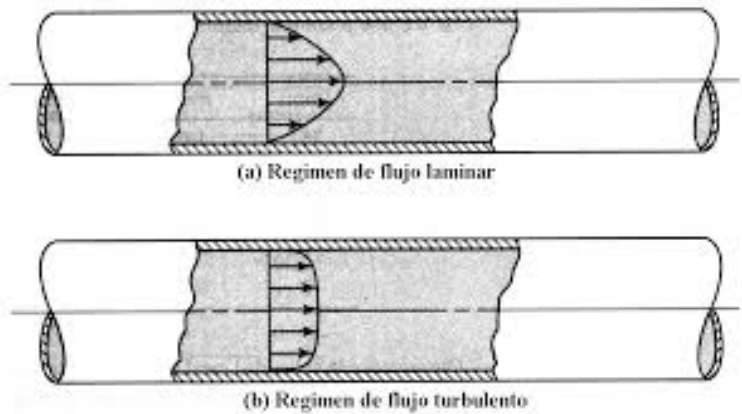


Figura 2.1: Gradiente de velocidades del flujo confinado entre paredes en regimen laminar y turbulento.

El desarrollo laminar del flujo en la entrada de un conducto ha captado la atención de muchos investigadores como Schmidt y Zeldin [7] y Shah y London [8].

La geometría de un flujo de entrada para un conducto de radio a se muestra en la Figura 2.2. La velocidad a la entrada es prácticamente uniforme, y esta suposición es común en los estudios teóricos. La capa límite empieza en la entrada, como ya se ha comentado anteriormente, y su comportamiento inicial sigue el comportamiento definido por la ecuación de Blasius para la solución de una placa plana (esta solución puede verse en [9]). Sin embargo, debido a los requerimientos de continuidad, un retardo cerca de las paredes debe causar un nucleo no viscoso en el centro del flujo que acelera al flujo, haciendo la capa límite más gruesa que la estimada por la ecuación de Blasius ([9]). A cierta distancia aguas abajo, las capas de corte se encuentran, y el conducto se rellena con la capa límite. Un poco después, el flujo se encuentra totalmente desarrollado en la forma parabólica de *Poiseuille*. Para flujo turbulento de entrada ocurren consideraciones similares, donde primero tiene un comportamiento laminar y luego se somete a una transición hacia la turbulencia antes de encontrarse aguas abajo.

El exceso de caída de presión es debido al incremento del cortante en la entrada de la capa límite y a la aceleración del núcleo del flujo. Si se aplica un análisis de momento en el volumen de control entre el inicio del conducto y el final del mismo, se puede obtener el balance que aparece en el libro de M. Rodriguez en el Capítulo 4.9 [10].

Por otro lado, el flujo turbulento se encuentra en la mayoría de casos prácticos en ingeniería, por lo que es muy importante su estudio. El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones rápidas y “aleatorias” de regiones giratorias del fluido, denominadas

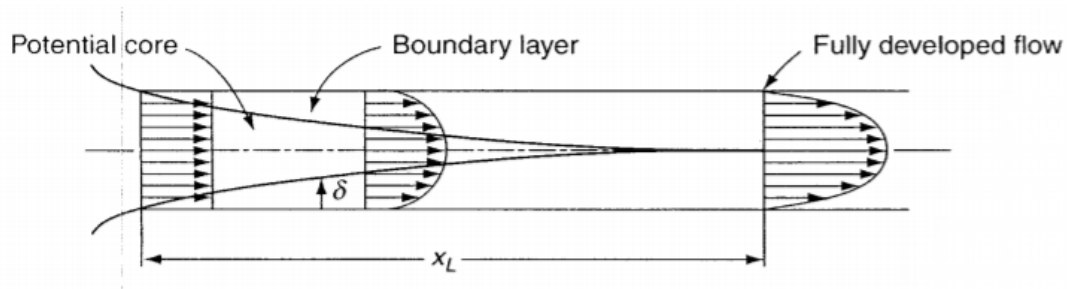


Figura 2.2: Evolución de la capa límite laminar en un flujo que atraviesa un conducto.

torbellinos, a lo largo de todo el flujo. Estas fluctuaciones proporcionan un mecanismo adicional para el momento y la transferencia de energía. Los torbellinos en flujo turbulento transportan masa, momento y energía a otras regiones del flujo mucho más rápido que en el flujo laminar, favoreciendo la transferencia de momento, calor y energía. Como resultado de esto, el flujo turbulento se asocia con valores altos de los coeficientes de fricción, transferencia de calor y transferencia de masa.

A diferencia del flujo laminar, las expresiones para la velocidad del perfil en flujo turbulento están basadas en análisis y medidas, por lo que son ecuaciones semi-empíricas con constantes determinadas por datos experimentales. Considerando un flujo turbulento totalmente desarrollado en un conducto, y siendo u la velocidad en la dirección axial.

Los perfiles de velocidad típicos para flujos turbulentos y laminares son los que se han mostrado en la Figura 2.1, como se ha comentado anteriormente. El flujo turbulento a lo largo de la pared puede considerarse que se compone de cuatro regiones, caracterizadas por la distancia desde la pared. La pequeña capa más cercana a la pared donde los efectos de la viscosidad son dominantes, se denomina subcapa límite laminar y se caracteriza por el espesor δ_0 . En esta capa, el perfil de la velocidad es prácticamente lineal. Justo después de la subcapa laminar, se encuentra la *buffer layer*, en la cual los efectos de la turbulencia comienzan a tener importancia, pero el flujo está dominado todavía por los efectos de la viscosidad. Encima de la *buffer layer* está la capa de transición, en la cual los efectos de la turbulencia son más significativos, pero no dominantes. Encima de esta se encuentra la capa turbulenta, donde los efectos turbulentos dominan sobre los efectos de difusión molecular, o efectos viscosos. Esta evolución de la capa límite y la división de la capa límite turbulenta puede observarse en la Figura 2.3.

El espesor de la subcapa límite laminar es muy pequeño, sin embargo, juega un papel importante en las características del flujo debido al gran perfil de velocidades presente en esta subcapa. La pared evita cualquier movimiento de torbellinos, por lo que el flujo en esta capa es esencialmente laminar y el cortante es proporcional a la viscosidad del fluido. Considerando que la velocidad cambia de cero a un valor cercano al del núcleo del flujo en una capa de un espesor muy pequeño, se puede esperar que el perfil de velocidades de esta sea lineal, lo que se confirma experimentalmente. El espesor de esta subcapa laminar se determina por δ_0 y su valor es inversamente proporcional al valor de la velocidad.

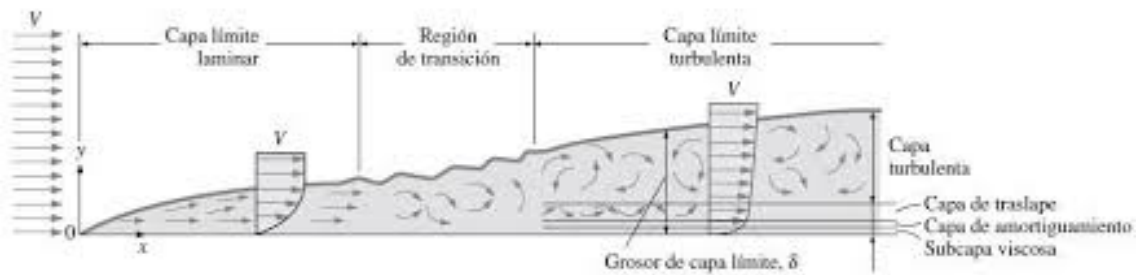


Figura 2.3: Evolución de la Capa límite a lo largo del conducto.

Como consecuencia de esto, el perfil de velocidades con la distribución de la velocidad se vuelve más uniforme cuanto mayor es el número de Reynolds.

A pesar de el pequeño espesor de la subcapa límite laminar, las características del flujo en el resto del conducto en esta capa son muy importantes ya que establecen el estado del flujo a lo largo del conducto. Cualquier irregularidad en la superficie perturba a esta capa y afecta al fluido. Por lo tanto, el factor de fricción en flujo turbulento depende fuertemente de la rugosidad de la superficie.

El efecto de la rugosidad absoluta sobre el flujo depende de su magnitud y su distribución a lo largo del eje longitudinal. La medición directa de su magnitud requiere equipos muy precisos, por lo que se realiza un cálculo de forma indirecta de la rugosidad absoluta, la cual presenta dimensiones lineales, que considera el efecto tanto de la magnitud como de la distribución de las irregularidades sobre la superficie del tubo.

Las irregularidades del conducto generan pequeños vórtices. Cuando esta rugosidad absoluta, denominada con la letra e (se puede observar en la Figura 2.4), es menor que el espesor de la subcapa laminar, los vórtices generados por esta son eliminados por la viscosidad existente en la subcapa laminar, lo que provoca que su efecto desaparezca. Si por el contrario, estas irregularidades son mayores que la subcapa límite, generan vórtices que superan la subcapa laminar contribuyendo a la generación de turbulencia dentro del conducto. El primer caso, en el que la rugosidad no afecta a la generación de turbulencia, se habla de una superficie “hidráulicamente lisa”, en el segundo caso, en el que estas irregularidades sí que ayudan a la generación de turbulencia, se habla de una superficie denominada “hidráulicamente rugosa”.

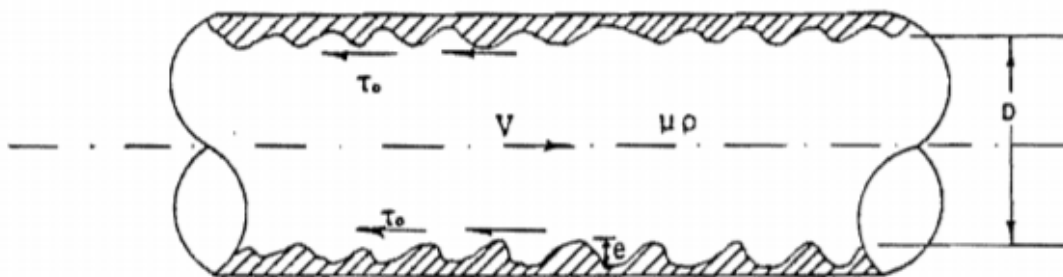


Figura 2.4: Rugosidad absoluta de un conducto de sección circular.

En cualquier tipo de flujo, las partículas viajan de los sitios de mayor energía total a las zonas con menor energía total. Si se aplica la ecuación general entre dos puntos dentro del flujo confinado en el conducto de sección transversal circular constante, se obtiene la siguiente expresión para flujo incompresible (Ecuación 2.1):

$$h_f = \frac{\Delta p}{\gamma} \quad (2.1)$$

Esto indica que la pérdida de energía específica se manifiesta como una disminución en la presión que el fluido ejerce sobre las paredes del conducto.

La energía mecánica total que posee un fluido en movimiento está compuesta por la energía cinética y la energía potencial. La energía potencial a su vez está compuesta por la energía de presión y la energía de posición.

Una masa de fluido de peso w , que se mueve en un conducto, posee una energía potencial con respecto al plano de referencia que se puede describir de la siguiente forma (Ecuación 2.2):

$$E_p = w(z + \frac{p}{\gamma}) \quad (2.2)$$

La energía cinética de la misma se puede escribir como (Ecuación 2.3):

$$E_p = w \frac{v^2}{2g} \quad (2.3)$$

Por lo tanto, la energía total del sistema queda de la siguiente forma (Ecuación 2.4):

$$E_p = w(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}) \quad (2.4)$$

Al variar la velocidad del flujo a lo largo de toda la sección transversal, la energía cinética será diferente para cada una de las líneas del flujo.

Cuando el flujo avanza a lo largo del conducto, parte de la energía se transforma en calor. Esta energía se designa como pérdida de energía ya que no aporta movimiento al fluido. Estas pérdidas de energía pueden provenir de distintos orígenes.

El primero de ellos es debido a la fricción de las partículas entre ellas y entre las paredes del conducto y el debido a la turbulencia que produce el choque de grandes masas de partículas. Este tipo de pérdidas se denominan pérdidas por fricción. El factor de fricción es el que modela estas pérdidas y es función del número de Reynolds y de la relación entre la rugosidad y el diámetro del fluido.

Para completar esta explicación se puede recurrir al libro de Frank M. White [10] en el que se detalla toda la información de flujo a través de conductos.

2.2. Flujo alrededor de un cuerpo

Una vez comentado el comportamiento del flujo en el interior de un conducto, también es importante mencionar el comportamiento y los fenómenos que ocurren en el flujo que pasa alrededor de un cuerpo.

Los flujos alrededor de cuerpos es un tema importante en el diseño de estructuras, y el análisis correcto de la turbulencia favorece el conocimiento de las vibraciones estructurales, así como ciertos fenómenos de transferencia de calor y la aerodinámica del cuerpo.

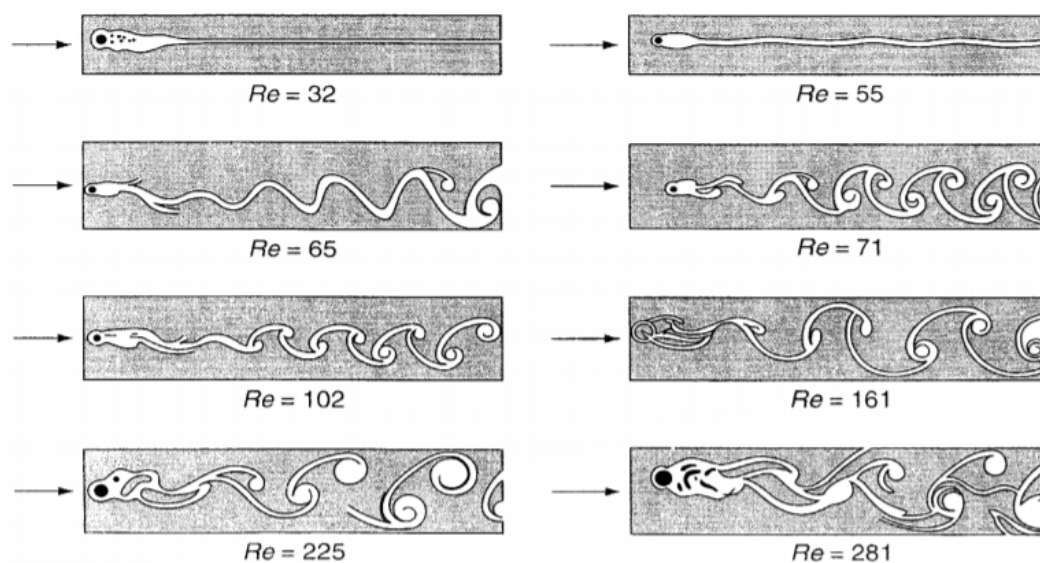


Figura 2.5: Evolución de los vórtices generados por un flujo atravesando un cilindro de sección circular con el número de Reynolds.

De los trabajos de flujos alrededor de cuerpos con sección circular, se han extrapolado conocimientos para la investigación de las estructuras turbulentas generadas por un cuerpo de sección transversal cuadrada. Mediante métodos de simulación numérica y trabajos experimentales, se ha observado que los modos de transición del flujo son similares a los encontrados en un cilindro de sección circular. A partir de un valor de número de Reynolds de 50 ([2]), se forman grandes vórtices bidimensionales alternados denominados “camino de Von Karman” (Figura 2.6) y que siguen la ley de Strouhal. Para valores más pequeños de este número de Reynolds, la turbulencia presente debido al desprendimiento de la capa límite se disipa a lo largo del eje longitudinal. Cuando el número de Reynolds asciende a valores cercanos a 200, el flujo se vuelve tridimensional, produciendo inestabilidades transversales que generan ondulaciones, propiciando que en los vórtices de Von Karman situados detrás del cuerpo se encuentren zonas con diferente velocidad longitudinal. Esta evolución de los vórtices con respecto al número de Reynolds se puede observar en la Figura 2.5, donde se aprecia el aumento de los vórtices del camino de Von Karman conforme aumenta el número de Reynolds. Este

efecto es el que se va a aprovechar en el trabajo para la generación de turbulencia en un conducto de sección circular.

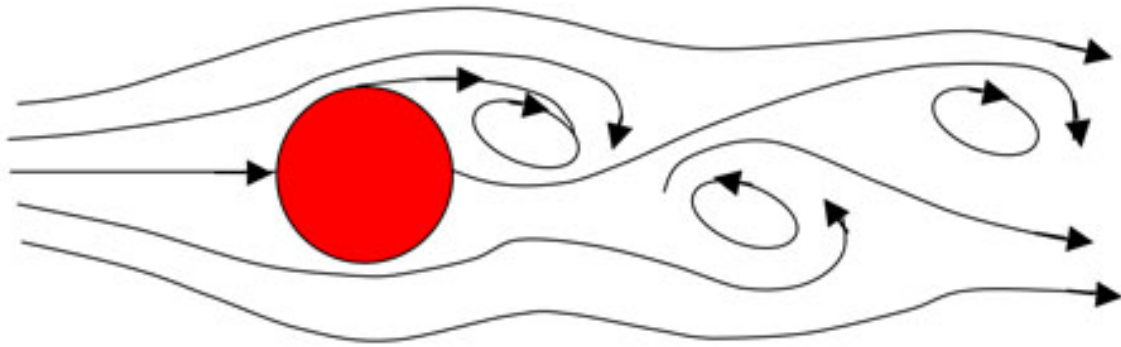


Figura 2.6: Camino de Von Karman.

Esto origina que las diferentes partes de los vórtices convecten a diferentes velocidades, alargándose y produciendo una gran vorticidad longitudinal. Este efecto de tridimensionalidad completa se puede observar a partir de números de Reynolds relativamente bajos, entre 300 y 400, con la ventaja de una estructura turbulenta grande que permite su estudio más detallado. Estos vórtices son los que originan las vibraciones y los fenómenos de transferencia de calor y acústicos mencionados anteriormente. Después de cierta distancia, que varía en función del número de Reynolds, la tridimensionalidad de la turbulencia se generaliza hasta llegar a una turbulencia cuasihomogenea isótropa.

En el caso del objeto de sección cuadrada, el desprendimiento de la capa límite se produce en puntos concretos situados en las aristas de la sección transversal. Como consecuencia de esto, se generan dos zonas de recirculación completamente definidas, cuasi estacionarias y paralelas al flujo sobre las caras de la sección transversal del objeto.

2.3. Técnicas para el estudio de la turbulencia

Para el estudio de la turbulencia se han desarrollado numerosas técnicas, entre las que se puede destacar las simulaciones RANS (“Reynolds Average Navier-Stokes”), los modelos LES (“Large Eddy Simulation”) y por último los modelos DNS (“Direct Numerical Simulation”).

La simulación RANS resuelve las medias estadísticas de las condiciones turbulentas del flujo. Estos son menos adecuados en condiciones estacionarias para la predicción de características turbulentas debido principalmente al promedio temporal. Por ello, estos modelos no son adecuados para la resolución de estructuras turbulentas asimétricas e inestables debidas a las capas cortantes y los gradientes de presión presentes.

Por otra parte se encuentran los modelos LES. Estos han incrementado su uso a lo largo de los años debido a su potencial para resolver problemas con elevado número de Reynolds, que anteriormente era impensable su resolución sin utilizar simulaciones

numéricas o DNS (Direct Numérical Simulation). Los modelos LES, son técnicas que consisten en la simulación de forma directa, sin necesidad de un modelo, de las grandes escalas del flujo, es decir de las escalas mayores al tamaño local de la malla. Las pequeñas escalas son filtradas y su efecto sobre las grandes escalas son modeladas a partir de un modelo submalla. Las ecuaciones de LES son encontradas al aplicar un filtro espacial $\Delta G(x)$ de tamaño Δ en las ecuaciones del movimiento. A partir de este filtrado se tiene una parte filtrada libre de pequeñas escalas las cuales se modelan mediante ecuaciones sencillas isentrópicas, y las estructuras turbulentas de tamaño mayor al del filtro, que se resuelven mediante ecuaciones de Navier Stokes en condiciones no estacionarias. La variable ojetivo estará formada por la suma de ambas.

$$f = \bar{f} + f' \quad (2.5)$$

Donde en la Ecuación 2.5 la \bar{f} hace referencia a la parte filtrada y la f' hace referencia a la parte submalla.

Las simulaciones DNS son una rama del CFD dedicada a la solución de alta fidelidad de flujos turbulentos. Se diferencia del CFD convencional en que este resuelve explícitamente la turbulencia sin utilizar ningún modelado para la misma, como es el caso de la simulación RANS, e incluyendo también las escalas pequeñas, a diferencia de las simulaciones LES. Las simulaciones DNS pueden verse como un experimento numérico que produce una serie de soluciones no empíricas para un modelo turbulento virtual. Su punto fuerte es la habilidad de proporcionar conocimiento completo, sin ser afectado por aproximaciones, en todos los puntos del flujo, en cualquier instante de la simulación. DNS es por lo tanto ideal para la investigación de cuestiones básicas relacionadas con la turbulencia y modelado. Esta habilidad, sin embargo, tiene un alto coste computacional, lo que evita que la simulación DNS se utilice como herramienta de diseño.

Capítulo 3

Metodología CFD.

3.1. Introducción CFD

Los aspectos físicos de cualquier fluido están gobernados por tres principios fundamentales:

- Conservación de la masa

Expresa que la masa ni se crea ni se destruye, por lo que se mantiene en el tiempo. Se puede expresar en forma diferencial (Ecuación 3.1) para el estudio de una partícula del flujo en cuestión o en forma integral (Ecuación 3.2) para el estudio de un cierto volumen de control.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \vec{u} dV + \int_{S_c} \rho \cdot (\vec{u} - \vec{u}_c) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3.2)$$

- Conservación de la cantidad de movimiento

Expresa la Segunda Ley de Newton. Expresa que la tasa de intercambio de cantidad de movimiento es igual a la fuerza resultante que actúa sobre esta parte del fluido. Al igual que la ecuación de conservación de la masa, se puede expresar en forma diferencial (Ecuación 3.3) y en forma integral (Ecuación 3.4).

$$\frac{\delta(\rho \vec{u})}{\delta t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = -\frac{dp}{dt} + \vec{\nabla} \tau + \rho \vec{f}_m \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \vec{u} dV + \int_{S_c} \rho \vec{u} \cdot (\vec{u} - \vec{u}_c) \cdot \vec{n} dS = \int_{S_c} \tau \cdot \vec{n} dS + \int_{V_c} \rho \vec{f}_m dV \quad (3.4)$$

■ Conservación de la Energía

Esta ley constituye el primer principio de la termodinámica, y expresa que la energía total de un sistema físico aislado no se crea ni se destruye, aunque esta sí que puede transformarse en otro tipo de energía.

La ecuación de conservación de la energía tiene en cuenta la energía del flujo a la entrada y a la salida del sistema de estudio. Se puede escribir en forma diferencial (Ecuación 3.5) y en forma integral (Ecuación 3.6).

$$\frac{\delta \rho h}{\delta t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho h \vec{u}) = -p \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + \vec{\nabla} \cdot (\sigma \cdot \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot (k \nabla(T)) + \rho \vec{f}_m \cdot \vec{u} + Q \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \left(h + \frac{1}{2} \vec{u}^2 \right) dV + \int_{S_c} \rho \left(h + \frac{1}{2} \vec{u}^2 \right) (\vec{u} - \vec{u}_c) \cdot \vec{n} dS = \\ \int_{S_c} \vec{n} \cdot \tau \cdot \vec{u} dS + \int_{V_c} \rho \vec{f}_m \cdot \vec{u} dV - \int_{S_c} \vec{q} \cdot \vec{n} dS + \int_{V_c} Q dV \end{aligned} \quad (3.6)$$

Estos principios fundamentales pueden expresarse en términos de ecuaciones matemáticas, las cuales en su forma más general son normalmente ecuaciones diferenciales. El CFD (Computational Fluid Dynamics) es el arte de reemplazar las ecuaciones diferenciales de gobierno del flujo por números, y alargar estos números en el espacio y el tiempo para obtener una expresión numérica final del flujo de interés. Esta descripción de CFD no incluye todo lo que abarca este, ya que hay problemas que permiten una resolución directa sin necesidad de extrapolar los resultados a lo largo del tiempo o el espacio, y otras aplicaciones que implican la resolución de ecuaciones integrales más que de ecuaciones diferenciales. El producto final de CFD es finalmente una colección de números, en contraste con una resolución analítica. Sin embargo, el objetivo a largo plazo de la mayoría de los análisis en ingeniería es una descripción cuantitativa del problema.

El instrumento que ha facilitado el crecimiento del CFD son las computadoras de alta velocidad. Las soluciones de CFD generalmente requieren la repetitiva manipulación de miles, incluso millones, de números, lo que es prácticamente imposible de resolver manualmente. Por lo tanto, los avances en CFD, y su aplicación a problemas de mayor detalle y sofisticación, están altamente relacionados con los avances en el hardware de los ordenadores, particularmente con el almacenamiento y la rapidez de ejecución. Es por esto que el mayor esfuerzo en el desarrollo de superordenadores viene de la comunidad CFD. (J. ANDERSON [5])

La primera generación de soluciones CFD surgieron sobre los años 50 y 60, estimulada por la llegada simultánea de ordenadores eficientes y de alta velocidad y la necesidad de resolver el problema de alta velocidad y temperatura de la reentrada de un cuerpo. La alta temperatura necesitaba la inclusión de vibraciones energéticas y reacciones químicas en problemas de flujo, a veces en equilibrio y otras en situaciones de no equilibrio. Tal fenómeno físico generalmente no podía ser resuelto analíticamente,

ni siquiera para la geometría más sencilla de flujo. Por lo tanto, la resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo en un ordenador de alta velocidad era una absoluta necesidad.

La segunda generación de soluciones CFD, las cuales hoy son generalmente descriptivas de la disciplina, implican la aplicación de las ecuaciones de gobierno aplicadas a problemas de fluido dinámica que son tan complicadas por ellas mismas que la utilización de un ordenador es casi obligatoria. Ejemplos de problemas de esta dificultad son flujos mezclados supersónicos y subsónicos y flujos viscosos que no son sensibles a la aproximación de la capa límite, así como separación de flujo y recirculación. Para estos casos, se requiere una solución exacta para las ecuaciones completas de Navier-Stokes. Para estos casos la introducción de la técnica “*time dependent technique*” ha generado una revolución en los cálculos del campo del flujo.

El rol del CFD en las predicciones de la ingeniería se ha vuelto tan fuerte que puede verse como una nueva “tercera dimensión” en la dinámica de fluidos, siendo las otras dos los clásicos casos de experimentación y teoría pura. Esta relación la podemos observar en la Figura 3.1. Hasta la mitad de la década de los 60, los avances en la dinámica de fluidos se realizaban mediante la combinación de experimentos pioneros y teoría básica de análisis, los cuales necesitaban el uso de modelos simplificados de flujo para obtener soluciones a las ecuaciones de gobierno del flujo. Estas soluciones tenían la ventaja de identificar inmediatamente algunos de los parámetros fundamentales de un problema dado, y demostrar como la respuesta del problema esta influenciada por algunos de los parámetros del mismo. Frecuentemente tiene la desventaja de no incluir todos los requisitos físicos del flujo. En este escenario apareció el CFD. Con su habilidad de manejar las ecuaciones en su forma exacta, junto con la inclusión de fenómenos físicos detallados como reacciones químicas, CFD se convirtió rápidamente en una herramienta de análisis en la ingeniería. Hoy en día, CFD apoya y complementa la experimentación y la teoría.

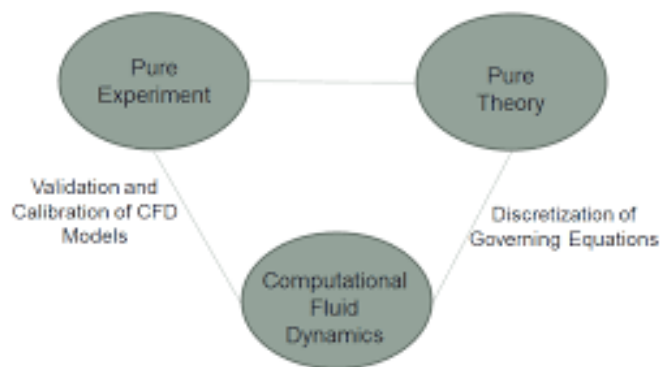


Figura 3.1: Relación entre CFD, experimentación y teoría.

Uno de los aspectos mas importantes de CFD en la actualidad es el impacto que está teniendo en las pruebas de túnel de viento. Esto está relacionado con el rápido descenso del coste computacional comparado en el rápido incremento de coste de las pruebas en

túnel de viento. Este descenso del coste computacional es debido al continuo desarrollo de nuevos ordenadores con mayor velocidad de cálculo, liderados por una clase de ordenadores denominados superordenadores. Como resultado de esto, los cálculos de las características aerodinámicas de diseños de aeronaves nuevas vía CFD se está volviendo más barato que medir las mismas características mediante la experimentación en un túnel de viento.

Los resultados CFD serán solo tan válidos como los modelos físicos incorporados en las ecuaciones de gobierno y sus condiciones de contorno, por lo que están sujetos a fallo, especialmente en flujos turbulentos. Los errores asociados con el algoritmo de resolución numérica así como los errores de redondeo, combinados, comprometen la precisión de los resultados CFD.

3.2. Introducción a OpenFOAM

Para la realización de este proyecto se utiliza el software CFD de código libre OpenFOAM.

OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) es un software computacional de código libre y gratuito utilizado en gran parte de las áreas de ingeniería y ciencia para el estudio de la mecánica de fluidos. Este software tiene la capacidad de resolver una gran variedad de problemas relacionados con la mecánica de fluidos, por lo que es un programa capaz de competir con otros softwares CFD de pago.

Este software nace en el Imperial College de Londres, una de las instituciones con más nombre en el estudio de la mecánica de fluidos. OpenFOAM fue desarrollado en sus inicios por OpenCFD Ltd, organización que fue fundada por los estudiantes de esta institución que se encontraban realizando el doctorado y fue distribuido más adelante por la fundación OpenFOAM, la cual se encarga de la gestión del desarrollo y la distribución del producto.

OpenFoam está organizado en un conjunto de librerías, las cuales se emplean para la creación de aplicaciones las cuales se ejecutan para la resolución del problema deseado. Las librerías se dividen en dos tipos de categorías:

- *solvers*. Es la que se encarga de realizar el cálculo real para la resolución del problema específico de mecánica continua.
- *utilities*. Sirve para la manipulación de la información, como puede ser la preparación de la malla y el procesamiento de los resultados.

Además de esto, también incluyen una serie de paquetes útiles para el postprocesado, como es el caso de ParaView, utilizado para la obtención de imágenes de los problemas resueltos en este trabajo.

El mayor atractivo de este producto es su código libre, que permite al usuario modificar su código original para adaptarlo al problema fluido mecánico que se quiera

resolver.

3.2.1. Estructura general de OpenFOAM

Este software presenta herramientas de preprocesado, solver y postprocesado, por lo que es posible la configuración del caso a todos los niveles. La estructura general del software OpenFOAM puede verse en la Figura 3.2

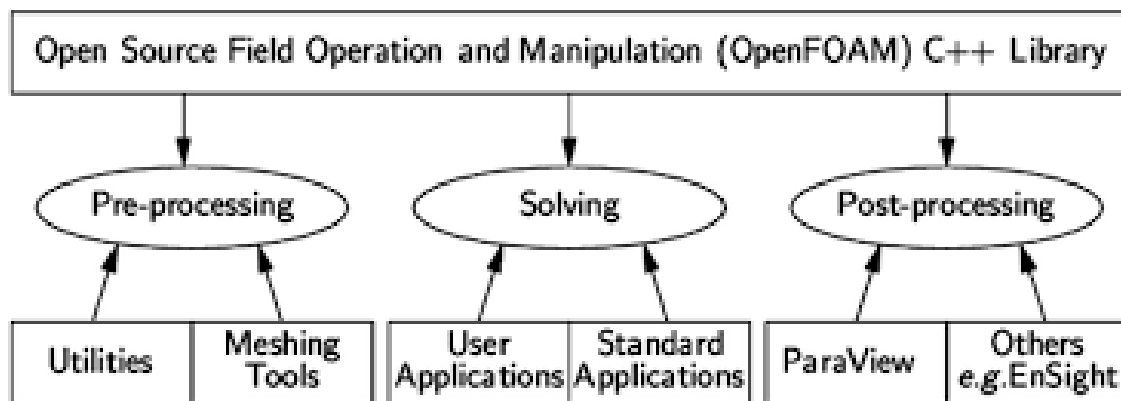


Figura 3.2: Estructura general del software OpenFOAM.

Para el estudio y la resolución de un problema determinado con el software OpenFOAM es necesario la creación de tres directorios principales. Cada uno de los directorios tiene una función específica y son esenciales para poder realizar el estudio del problema. Esta configuración se puede observar en la Figura 3.3

- Directorio *system*: En él se establecen, como mínimo, los parámetros relacionados con la resolución del problema. Este debe contener tres archivos: el archivo *ControlDict* en el que se controlan los parámetros de ejecución del problema. Este contiene los tiempos de inicio y fin de la simulación, así como los intervalos de tiempo en los que se guardará la información. El archivo *fvSchemes*, el cual controla los esquemas para el procedimiento de discretización, y el archivo *fvSolution* que contiene información sobre el *solver* que se quiere utilizar, explicado en la Subsección 3.2.2.

En el archivo *fvSchemes* se establecen el esquema numérico para los términos, tales como los términos derivativos de las ecuaciones, que aparecen en las aplicaciones que se ejecutan. Los términos a los que normalmente se debe asignar un esquema numérico en *fvSchemes* oscila desde derivadas a interpolaciones de valores de un conjunto de puntos a otro.

- Directorio *constant*: En este se detallan los parámetros que describen la geometría y la malla del problema. Se explica más detalladamente en la Sección 3.3.
- Directorio de tiempos, 0: Este directorio contiene los archivos de información de campos particulares, como son las condiciones iniciales y las condiciones de

contorno requeridas para el problema que se quiera resolver. Estos directorios temporales corresponden con los tiempos de simulación, por lo que antes de ejecutar el problema solo estará presente el directorio 0.

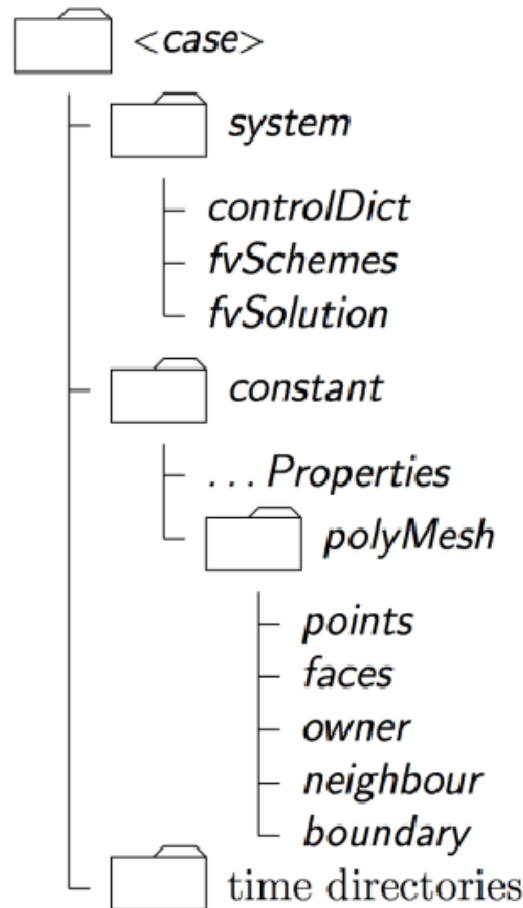


Figura 3.3: Directorios principales de un caso particular en OpenFOAM.

3.2.2. El *solver*

Se decide utilizar el *solver* `pimpleFoam` ya que este *solver* es idóneo para la resolución de problemas transitorios de flujo incompresible y turbulento. Estos cálculos se realizan mediante el algoritmo PIMPLE, que se puede ver detalladamente en la guía del usuario de OpenFOAM [11].

El algoritmo PIMPLE es una combinación de PISO (“Pressure Implicit with Splitting of Operator”) y SIMPLE (“Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations”). Ambos son *solvers* iterativos pero PIMPLE y PISO se usan para casos transitorios, como se ha comentado previamente, mientras que SIMPLE se usa para casos estacionarios.

La mejor forma de pensar en este algoritmo, es imaginarlo como un algoritmo SIMPLE para cada intervalo de tiempo, donde los correctores externos son iteraciones,

y una vez convergen se mueve al siguiente paso temporal hasta que la solución es completada. Se consigue una mejor estabilidad con el algoritmo PIMPLE sobre el PISO por esta razón, especialmente cuando se trabaja con pasos temporales largos, donde el número de Courant máximo debe estar constantemente por encima de la unidad o cuando la naturaleza de la solución es inherentemente inestable. Este algoritmo se encarga de la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes para el cálculo de la presión y la velocidad. PIMPLE está diseñado para que cumpla las ecuaciones de conservación de la masa, conservación de la energía y conservación del momento y sigue los siguientes pasos, esquematizados en la Figura 3.4.

- **Paso predictivo.** En este paso el algoritmo supone un campo de presiones inicial a partir del cual calculará el campo de velocidades utilizando las ecuaciones de conservación comentadas anteriormente. El campo de presiones inicial puede ser o no ser correcto.
- **Pasos correctivos.** En el caso del algoritmo PIMPLE, este está compuesto por dos pasos correctivos distintos. El primero de ellos es un corrector interior que se encarga de corregir la presión obtenida a partir de la resolución de la ecuación de la energía al incluir el campo de velocidades obtenido en el primer paso predictivo. Una vez converge la solución de la presión se comprueba la convergencia de la solución completa, si esta no converge, entra el segundo corrector, el cual calcula un nuevo campo de velocidades a partir de la última presión obtenida en el primer bucle.

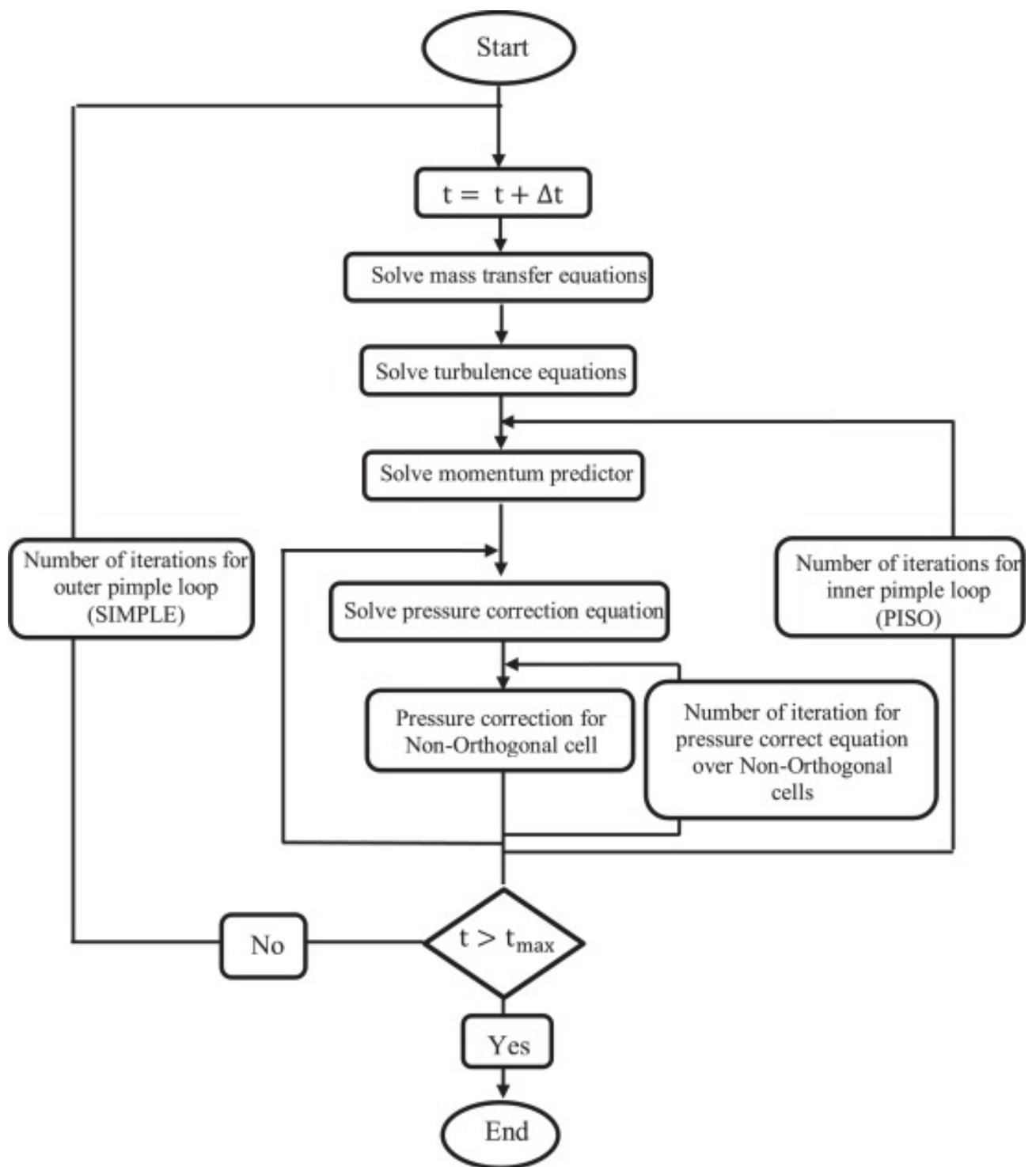
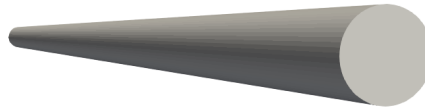


Figura 3.4: Esquema del algoritmo PIMPLE.

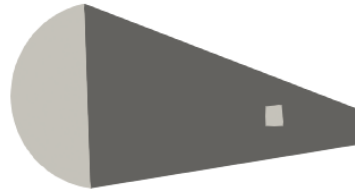
3.3. Geometría y mallado

3.3.1. Geometría

Para la realización de este trabajo se utilizan dos geometrías. Estas geometrías son idénticas, con las mismas dimensiones de radio y longitud del cilindro, sin embargo, se diferencian en la presencia de un objeto de sección cuadrada en el interior de una de ellas que propicia la generación de estelas turbulentas a lo largo del conducto. Estas geometrías pueden verse en la Figura 3.5.



(a) Geometría exterior



(b) Geometría interior de la geometría 2

Figura 3.5: Geometría empleada

Las dimensiones de las dos geometrías se pueden observar en la Tabla 3.1, donde *Longitud* hace referencia a la longitud en el eje x , *Diámetro* hace referencia al diámetro de la sección circular y *Lado cuadrado* hace referencia a las dimensiones del objeto de sección cuadrada presente en la segunda geometría.

Dimensión	Geometría 1	Geometría 2
Longitud (μm)	3620	3620
Diámetro (μm)	90	90
Lado cuadrado (μm)	-	20

Tabla 3.1: Características geométricas del problema.

Al tratarse de conductos con unas medidas del orden de micrómetros, el estudio de las condiciones de flujo interno mediante técnicas experimentales es muy complicada, por lo que se realiza el estudio únicamente con técnicas CFD.

3.3.2. Mallado

El mallado es una partefundamental de la solución numérica y debe satisfacer un determinado criterio para asegurar la validez, y por lo tanto la precisión, de la solución. Durante cualquier simulación, el software comprueba que la malla satisface una larga lista de restricciones y parará la simulación si estas restricciones no son satisfechas.

Por defecto, OpenFOAM define una malla de celdas poliédricas en 3-D, rodeadas por caras poligonales. Una malla con esta configuración es conocida por OpenFOAM como **polyMesh**. Este tipo de mallado ofrece una gran libertad a la hora de generar y manipular las mallas, particularmente cuando la malla del dominio es compleja o cambia a lo largo del tiempo.

Las celdas se definen por el orden de los puntos en concordancia con el número del esquema contenido en el modelo de forma. El orden de los puntos y las caras se puede ver en la Figura 3.6. Si este orden es alterado produce error en el mallado.

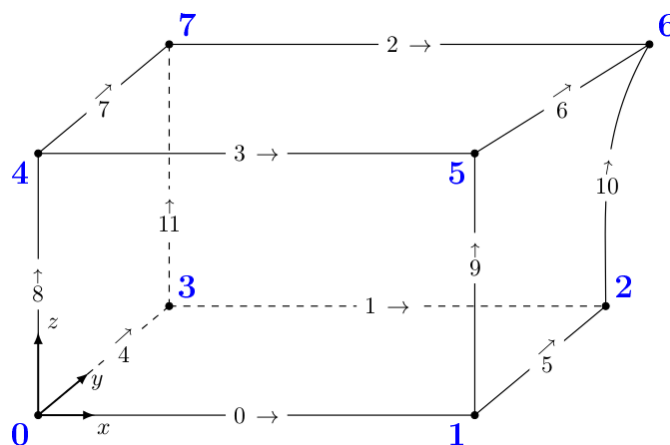


Figura 3.6: Numeración celda OpenFOAM.

La malla se genera desde un archivo denominado *BlockMeshDict*, el cual se encuentra en el directorio *system*. La acción *BlockMesh* lee este archivo, genera la malla y copia los datos de la malla de los ficheros de puntos y caras, celdas y contornos en el mismo directorio.

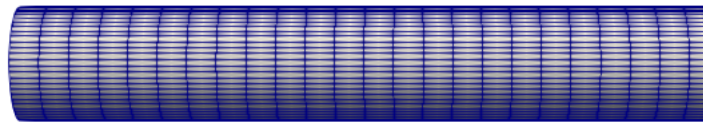
El principio detrás de *BlockMesh* es descomponer la geometría del dominio en bloques hexaédricos. Las aristas de los bloques pueden ser líneas rectas, arcos o splines. La malla es especificada como un número de celdas en cada dirección del bloque, con información suficiente para que la acción *BlockMesh* genere la malla.

En este caso, la definición de la malla se realizará a partir de un archivo Matlab el cuál generará el archivo *BlockMeshDict*. En este archivo se detallan los tipos de celdas que se quieren utilizar para el mallado, así como el tipo de caras presentes en la geometría.

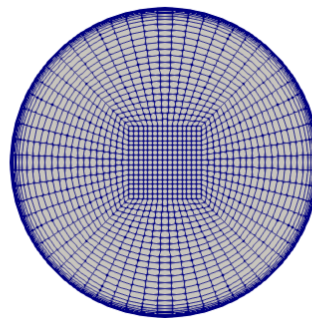
En ambas geometrías presentes durante el estudio se sigue el mismo formato de

mallado.

Se definen bloques hexaédricos (con ayuda del comando *hex*) a lo largo de todo el conducto. En el centro de la sección circular se genera una malla rectangular de la cual parten los arcos que posteriormente generaran la sección circular de la geometría. Para generar los arcos y poder hacer la forma circular se utiliza el comando *arc*. El resultado puede observarse en la Figura 3.7.



(a) Sección longitudinal de la Geometría 1



(b) Sección transversal de la Geometría 1

Figura 3.7: Mallado de la Geometría 1

En la zona más cercana a las superficies del conducto, se produce la aparición de la capa límite, como se ha comentado en el Capítulo 2. Debido al mayor gradiente de velocidades y a la condición de no deslizamiento en la pared, se puede observar en la Figura 3.7b que es en esta parte donde se encuentra el mayor número de celdas y a su vez estas presentan un menor tamaño. Esta parte en la que la malla se encuentra más refinada tiene una altura igual a la de la capa límite, la cual ha sido calculada gracias a la ayuda de un script de Matlab. Este script de Matlab utiliza ecuaciones sacadas del libro de Schlichting, H. (1995) [16]. Esta capa límite se extiende a lo largo de toda la sección longitudinal.

En el caso de la Geometría 2, la geometría exterior es la misma que la presente en el caso de la geometría simple, sin embargo, en el interior del conducto se incluye un cubo cuyas dimensiones se explican en Tabla 3.1, el cual generará turbulencia de acuerdo con la teoría explicada en el Capítulo 2.

La malla, al igual que en el caso anterior, fue creada mediante un fichero de Matlab. Este fichero te facilita la obtención del archivo BlockMeshDict, en el cual se detallan las características del mallado, dividiendo la geometría en distintos bloques para refinar las mallas en las secciones deseadas. En este caso, se necesita refinar la malla en dos secciones de la geometría.

La primera zona en la que es interesante un refinado de la malla para evitar la divergencia de los cálculos y la mayor precisión de los mismos es en la zona de la capa límite, la cual estará presente en las zonas más cercanas a la pared como se ha comentado en la geometría anterior.

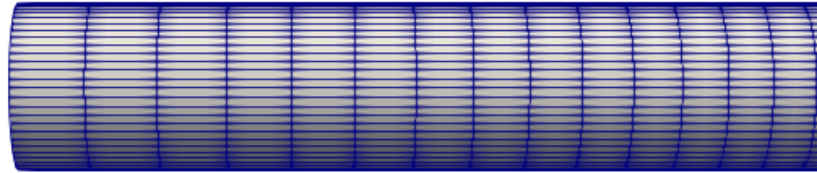
Por otro lado, se puede observar también una zona donde el flujo se desprenderá. Esta zona se encuentra en las aristas del cubo incluido en el interior del conducto de sección circular. Es por ello que en este caso, como se puede ver en la 3.8c, la malla se encuentra refinada en las zonas próximas a las aristas, con el fin de poder resolver de una forma más precisa los vórtices generados.

El número de celdas empleado en cada caso se puede ver en la Tabla 3.2. Como se puede observar, el número de celdas es mayor en la segunda geometría debido a la presencia del cuerpo de sección cuadrada, donde es necesario un refinamiento y un mayor número de celdas como se ha comentado previamente.

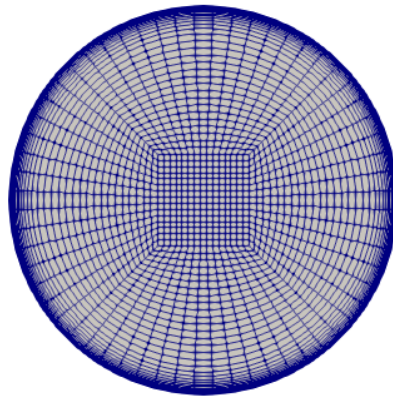
Para la obtención del número de celdas se utiliza un script de Matlab en el cuál se detallan las condiciones de entrada, como pueden ser la velocidad y las características del fluido a estudiar, así como las características geométricas del problema. Para este caso se requiere un $y^+ = 1$ en la capa límite para que la malla sea refinada y la solución se acerque más a la realidad. Una vez se insertan estos datos en el script, este te especifica el número de celdas necesarias para cada sección del conducto, dando como resultado el número de celdas especificado en la Tabla 3.2.

Geometría	Número de celdas
Geometría 1	276.000
Geometría 2	995.880

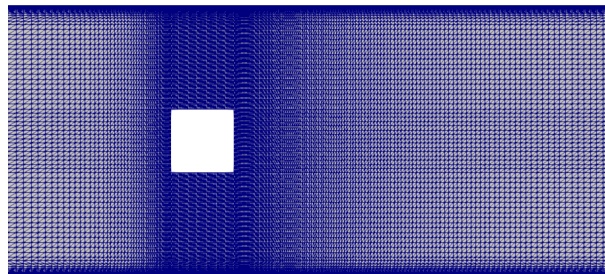
Tabla 3.2: Número de celdas presente en cada geometría.



(a) Sección longitudinal de la Geometría 2



(b) Sección transversal de la Geometría 2



(c) Mallado interior de la Geometría 2

Figura 3.8: *Mallado de la Geometría 2*

3.4. Condiciones de contorno

Las fronteras son un tema muy complicado ya que su rol en el modelado no es solo ser una entidad geométrica, si no una parte integral de la de la solución y los números a partir de las condiciones de contorno o las conexiones entre las distintas fronteras.

Primero, se necesita considerar que, para el propósito de aplicar condiciones de contorno, una frontera es normalmente dividida en un conjunto de porciones. Cada *patch* debe incluir uno o más áreas encerradas de la superficie de frontera, la cual no tiene por qué estar conectada físicamente. Se debe asignar a cada *patch* un tipo de condición de contorno como parte de la descripción de la malla, como parte de un fichero de frontera. Este describe el tipo de *patch* en términos de la geometría.

Los principales tipos de geometría que están disponibles en OpenFoam se pueden ver a continuación:

- *Patch*: tipo genérico que contiene información no geométrica o topológica sobre la malla. Se suele usar para las superficies de entrada o de salida.
- *Wall*: para superficies que corresponden con paredes sólidas. Requiere modelado físico y se suele utilizar para funciones de pared en modelos de turbulencia.
- *symmetryPlane*: para superficies planas con un plano de simetría.
- *Cyclic*: permite a dos superficies ser tratadas como si estuviesen físicamente conectadas.

Los principales tipos de condiciones de contorno que están disponibles en OpenFOAM son las siguientes:

- *fixedValue*: el valor de la variable especificado por un valor.
- *fixedGradient*: el gradiente normal de la variable es especificado.
- *zeroGradient*: el gradiente normal de la variable es nulo.
- *Mixed*: mezcla *fixedValue*/*fixedGradient* dependiendo del valor de *valueFraction*.

Existen también numerosas condiciones de contorno complejas derivadas de las condiciones básicas. Por ejemplo, muchas de estas condiciones complejas derivan de *fixedValue*, donde el valor es calculado mediante una función derivada de otras superficies.

La condición de *inletOutlet* está derivada de la condición de contorno mixed, la cuál se intercambia con *zeroGradient* cuando el fluido fluye fuera del dominio de una cara, y *fixedValue*, cuando el fluido fluye en el interior del dominio. Para flujos de entrada, el valor es especificado por un valor fijo de entrada especificado en *inletValue*.

En el caso de las geometrías de estudio de este trabajo, se divide el conducto de sección circular en dos partes que se pueden ver en la Figura 3.9.

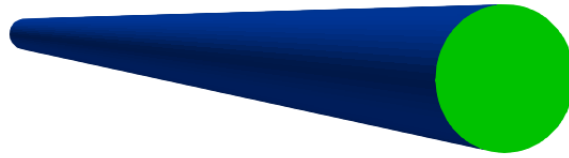


Figura 3.9: Partes de la Geometría de estudio.

La geometría exterior del conducto se ha denominado *WallFarfield*, que se puede observar en la Figura 3.9 de color azul, mientras que las dos bases del conducto se han denominado *inlet/outlet* dependiendo si corresponde con la entrada o la salida del conducto y corresponde con el color verde en la Figura 3.9.

En cuanto a los tipos de geometría empleados, se ha utilizado la tipo *wall* para la *boundary WallFarfield*, que simulará las paredes del conducto, mientras que para la entrada y salida (denominadas *inlet/outlet* como se ha dicho previamente) se ha aplicado la condición geométrica *patch*.

Las condiciones de contorno se establecen según la variable en cada caso. Las distintas condiciones de contorno establecidas para cada variable en cada punto de la geometría son las siguientes.

- *U*: en el caso de la velocidad, se utiliza un tipo *zeroGradient* para la salida del conducto, y un tipo *fixedValue* para la entrada del conducto, donde se define la velocidad inicial del flujo en el conducto, y para las paredes, donde se estipula que velocidad será nula.
- *p*: para la presión se utiliza la condición de contorno del tipo *zeroGradient* para la entrada y las paredes del conducto, mientras que para la salida se utiliza una condición de contorno del tipo *fixedValue*, donde se define la presión inicial a la salida del conducto..
- *nut*: en este caso las condiciones de contorno para la entrada y salida son iguales y del tipo *calculated*, la cual calcula el valor de esta variable en función del resto de variables, mientras que en la pared definimos una condición de contorno del tipo *zeroGradient*. Se explica en la Sección 3.5.

Para el caso de la geometría que presenta el cubo en su interior, se ha denominado a este *wallBody*, definiendo una geometría de tipo *wall*. Para las distintas variables se utiliza la misma condición de contorno que para las paredes del conducto.

3.5. Descripción de los modelos subgrid para LES.

Como se ha explicado anteriormente en el Capítulo 2, los modelos de turbulencia LES utilizan filtros para el modelado de las escalas turbulentas. Estos filtros se definen según el *subgrid* elegido.

Para este trabajo, se realizan simulaciones con tres tipos distintos de *subgrid* con el objetivo de comparar los resultados obtenidos y discutir su validez según la teoría y los estudios realizados hasta la fecha.

Para la realización del estudio se decide utilizar los siguientes *subgrid*, los cuales serán explicados a continuación.

- Smagorinsky subgrid scale
- One equation eddy-viscosity SGS model (*k equation*)
- WALE (*Wall-Adapting Local Eddy-viscosity*)

3.5.1. Smagorinsky

El modelo de Smagorinsky *subgrid scale* (SGS) fue desarrollado por Joseph Smagorinsky en la comunidad meteorológica en los años 60. Está basado en la suposición de la viscosidad turbulenta, que postula una relación lineal entre el esfuerzo cortante SGS y el ratio de resolución del tensor de tensiones. Este modelo ha servido como base para los modelos SGS.

El modelo Smagorinsky SGS es el más antiguo y el más conocido de los modelos de *subgrid scale*. El valor del tensor viene dado por las siguientes fórmulas.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3.7)$$

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} + \left(\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (3.8)$$

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} k_{sgs} \delta_{ij} - 2 \nu_{sgs} dev(\bar{D})_{ij} \quad (3.9)$$

Donde ν_{sgs} es viscosidad turbulenta de la escala *subgrid* y el tensor de velocidad de deformación a escala resuelta \bar{D}_{ij} se puede definir como:

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta \bar{u}_i}{\delta x_j} + \frac{\delta \bar{u}_j}{\delta x_i} \right) \quad (3.10)$$

y la energía cinética de la escala *subgrid*, k_{sgs} , viene dada por:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} (\overline{u_k u_k} - \bar{u}_k \bar{u}_k) \quad (3.11)$$

La escala *subgrid* del tensor τ_{ij} está dividido en una parte isotrópa $\frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij}$ y una parte anisótropa $\tau_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij}$ como se puede observar en la Ecuación 3.8.

La primera suposición que se realiza es la de aproximar la viscosidad turbulenta. En analogía con el tensor viscoso molecular en flujos laminares, la parte anisótropa es aproximada relacionando el ratio resuelto del tensor \overline{D}_{ij} como en la Ecuación 3.12.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij} \approx -2\nu_{sgs}dev(\overline{D})_{ij} \quad (3.12)$$

En OpenFOAM, viscosidad turbulenta de la escala *subgrid* se calcula tal y como se expone a continuación en la Ecuación 3.13.

$$\nu_{sgs} = C_k \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (3.13)$$

Donde C_k es una constante del model cuyo valor por defecto es 0.094 y Δ es el tamaño de malla que define la longitud de la escala *subgrid*. El método para calcular Δ se especifica en el fichero *turbulenceProperties* y sus posibles opciones son:

- *cubeRootVol*
- *maxDeltaxyz*
- *maxDeltaxyzCubeRoot*
- *smooth*
- *vanDriest*
- *Prandtl*
- *IDDESDelta*

Cada uno de los métodos presenta unas características singulares, dependiendo su elección del tipo de problema que se quiera resolver, así como del tipo de modelo utilizado. Para el modelo Smatgorosky el más utilizado, y el elegido para este trabajo, es el *vanDriest*, como se puede observar en FUYIMA NOZAKI [12].

Lo que falta es evaluar la distribución de la energía cinética k_{sgs} de la escala *subgrid*. Esta energía cinética se calula con la suposición de un balance entre la energía disipada y la producida en la escala *subgrid*.

$$\overline{D} : \tau_{ij} + C_\epsilon \frac{K_{sgs}^{1.5}}{\Delta} = 0 \quad (3.14)$$

Donde el operador $:$ es un doble producto escalar de tensores de segundo orden que pueden ser evaluados como la suma de 9 productos de los componentes de los tensores. Se puede calcular la energía cinética k_{sgs} resolviendo la Ecuación 3.14 obteniendo el siguiente resultado:

$$k_{sgs} = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \right)^2 \quad (3.15)$$

Donde:

$$a = \frac{C_\epsilon}{\Delta} \quad (3.16)$$

$$b = \frac{2}{3} \text{tr}(\overline{D}) \quad (3.17)$$

$$c = 2C_k \Delta (\text{dev}(\overline{D} : \overline{D})) \quad (3.18)$$

En el caso de flujo incompresible, la Ecuación 3.18 se reduce a lo siguiente.

$$b = \frac{2}{3} \text{tr}(\overline{D}) = 0 \quad (3.19)$$

$$c = 2C_k \Delta (\text{dev}(\overline{D} : \overline{D})) = C_k \Delta |\overline{D}|^2 \quad (3.20)$$

Donde:

$$|\overline{D}| = \sqrt{2\overline{D} : \overline{D}} \quad (3.21)$$

Sustituyendo estas relaciones en la Ecuación 3.15 se obtiene el valor de la energía cinética.

$$k_{sgs} = \frac{c}{a} = \frac{C_k \Delta^2 |\overline{D}|^2}{C_\epsilon} \quad (3.22)$$

Se puede obtener la expresión para la viscosidad turbulenta de SGS en el caso de flujo incompresible sustituyendo la Ecuación 3.22 en la Ecuación 3.13.

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 |\overline{D}| \quad (3.23)$$

Por último se puede obtener la relación entre la constante de Smagorinsky y la constante C_s .

$$C_s^2 = C_k \sqrt{\frac{C_k}{C_\epsilon}} \quad (3.24)$$

Las características de este subgrid se enumeran a continuación.

- Utiliza un modelo algebraico *0-equation* para la resolución de la viscosidad de los torbellinos.

- El ratio de rotación no se tiene en cuenta en el cálculo de ν_{sgs} .
- Está basado en la suposición de equilibrio local.
- El valor apropiado de la constante de Smagorinsky depende del problema.
- No es capaz de manejar la transición.
- No es capaz de tratar con la dispersión de energía.
- La reducción de Van-Driest es necesaria para la viscosidad de los torbellinos en SGS en las áreas cercanas a la pared.

Estas tres últimas características vienen debido al hecho de que $\nu_{sgs} \geq 0$ en la Ecuación 3.13.

3.5.2. One equation eddy-viscosity SGS model (*k equation*)

Al igual que en el caso del modelo SGS de Smagorinsky, el modelo *One equation eddy-viscosity SGS* usa la aproximación de la viscosidad turbulenta, por lo que el tensor τ_{ij} se puede escribir aproximadamente como:

$$\tau_{ij} \approx \frac{2}{3}k_{sgs}\delta_{ij} - 2\nu_{sgs}dev(\overline{D})_{ij} \quad (3.25)$$

Donde ν_{sgs} es la viscosidad turbulenta de la escala *subgrid*, \overline{D} es el tensor de velocidad de deformación a escala resuelta definido en la Ecuación 3.26 y la energía cinética de la escala *subgrid* viene dada por la Ecuación 3.27.

$$\overline{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta \overline{u}_i}{\delta x_j} + \frac{\delta \overline{u}_j}{\delta x_i} \right) \quad (3.26)$$

$$k_{sgs} = \frac{1}{2}\tau_{kk} = \frac{1}{2}(\overline{u_k u_k} - \overline{u_k} \overline{u_k}) \quad (3.27)$$

La viscosidad turbulenta de la escala *subgrid* ν_{sgs} se calcula usando la ecuación de la energía cinética (Ecuación 3.27) y se obtiene lo siguiente:

$$\nu_{sgs} = C_k \sqrt{k_{sgs}} \Delta \quad (3.28)$$

Donde el valor de la constante C_k es el mismo que en el caso de Smagorinsky, es decir, el valor de la constante es de 0.094.

El procedimiento a seguir es el mismo que en el modelo Smagorinsky SGS pero existe una diferencia en lo que sigue. Estos modelos son diferentes en términos de cómo calculan el valor de la energía cinética k_{sgs} . El modelo Smagorinsky asume el equilibrio

local para el cálculo de k_{sgs} , pero el modelo *one equation eddy viscosity* resuelve una ecuación de transporte de k_{sgs} .

La razón principal para desarrollar modelos de una ecuación SGS es para superar la deficiencia de suponer el balance local entre la energía producida en SGS y la disipada adoptada en los modelos algebraicos de la viscosidad turbulenta. Este fenómeno puede ocurrir en flujos con un alto número de Reynolds y en casos de mallas de resolución gruesas.

La ecuación de transporte derivada para tener en cuenta el efecto de k_{sgs} debido a la producción, difusión y disipación tiene la siguiente forma:

$$\frac{\delta(\rho k_{sgs})}{\delta t} + \frac{\delta(\rho \bar{u}_j k_{sgs})}{\delta x_j} + \frac{\delta}{\delta x_j} [\rho(\nu + \nu_{sgs}) \frac{\delta k_{sgs}}{\delta x_j}] = -\rho \tau_{ij} : \bar{D}_{ij} - C_\epsilon \frac{\rho k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (3.29)$$

Los términos en la Ecuación 3.29 son, empezando por la izquierda, el término derivado del tiempo, el término convectivo, el término difusivo, el término productivo y por último el término disipativo. En el caso del modelo Smagorinsky, solo los términos productivos y disipativos se tienen en cuenta con la suposición de equilibrio local.

El término productivo de la Ecuación 3.29 puede ser reorganizado para dar paso a la expresión usada por la fuente del código de la siguiente forma:

$$-\rho \tau_{ij} : \bar{D}_{ij} = (-\frac{2}{3} \rho k_{sgs} \delta_{ij} + 2 \rho \nu_{sgs} dev(\bar{D})_{ij}) : \bar{D}_{ij} \quad (3.30)$$

$$-\rho \tau_{ij} : \bar{D}_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k_{sgs} \frac{\delta \bar{u}_k}{\delta x_k} + \rho \nu_{sgs} \frac{\delta \bar{u}_i}{\delta x_j} (2 \bar{D}_{ij} - \frac{1}{3} tr(2 \bar{D} \delta_{ij})) \quad (3.31)$$

Las características son las mismas que las descritas para el modelo SGS de Smagorinsky.

3.5.3. WALE

El modelo SGS WALE (*Wall-Adapting Local Eddy-viscosity*) es una de los mayores modelos SGS. Es un modelo algebraico de viscosidad turbulenta (*0-equation model*) como el modelo de Smagorinsky, pero presenta algunas características excelentes que el modelo Smagorinsky no presenta.

En el modelo WALE, la escala *subgrid* de la viscosidad turbulenta se evalúa de la forma que presenta la Ecuación 3.32.

$$\nu_{sgs} = C_k \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (3.32)$$

Donde C_k es la constante del modelo y k_{sgs} es la energía cinética de la escala *subgrid*. Su definición es la misma que la descrita en el apartado de Smagorinsky en la Ecuación 3.11.

La parte simétrica del cuadrado del tensor del gradiente de la velocidad S^d se calcula en la siguiente función.

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta \bar{u}_k}{\delta x_i} \frac{\delta \bar{u}_j}{\delta x_k} + \frac{\delta \bar{u}_k}{\delta x_j} \frac{\delta \bar{u}_i}{\delta x_k} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\delta \bar{u}_k}{\delta x_l} \frac{\delta \bar{u}_l}{\delta x_k} \quad (3.33)$$

Donde δ_{ij} es la delta de Kronecker. Esta es una función de dos variables, normalmente solo para integrandos no negativos, y su forma se muestra en la Ecuación 3.34:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (3.34)$$

Estas operaciones de tensores están resueltas en [13] y [14].

La energía cinética de la escala *subgrid* se puede escribir como:

$$k_{sgs} = \left(\frac{C_w^2 \Delta}{C_k} \right)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^3}{((\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4})^2} \quad (3.35)$$

Donde el tensor de velocidad de deformación a escala resuelta viene dado por la Ecuación 3.36.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta \bar{u}_i}{\delta x_j} + \frac{\delta \bar{u}_j}{\delta x_i} \right) \quad (3.36)$$

Finalmente, sustituyendo las expresiones de Ecuación 3.35 en la Ecuación 3.32 se obtiene la expresión de ν_{sgs} desada.

$$\nu_{sgs} = (C_w \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^3}{((\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4})} \quad (3.37)$$

Las características principales del modelo SGS WALE se enumeran a continuación.

- Usa un modelo algebraico de 0 ecuaciones para la viscosidad turbulenta.
- El ratio de rotación se tiene en cuenta para el cálculo de ν_{sgs} .
- Es capaz de manipular la transición.
- No es necesario utilizar ninguna reducción para ν_{sgs} en la región cercana a la pared.

Debido a estas características, se espera que el modelado del flujo en las zonas cercanas a la pared sea más preciso al utilizar el modelo SGS WALE que con los modelos anteriormente mencionados.

3.6. Postproceso

3.6.1. El método *Lambda2*

El método *Lambda2*, denominado también como método o criterio del vórtice, es un algoritmo que permite la detección de núcleos de vórtices en el campo de velocidad tridimensional de un flujo. Este método es un “Invariante de Galileo”, esto significa que aunque se le añada un campo de velocidades uniforme al campo de velocidad existente o este campo sea trasladado, el resultado seguirá siendo el mismo.

Este método surge debido a que el criterio existente anteriormente, que era la localización de los mínimos de presión en el flujo, no era suficiente como criterio de detección. Esto es debido a la posible existencia de mínimos de presión en zonas del flujo en las que no hay vórtices, debido a esfuerzos inestables, o la presencia de vórtices en zonas donde no existen mínimos de presión debido a los esfuerzos viscosos. La solución propuesta para eliminar estos efectos consiste en la descomposición del gradiente de velocidad J en su parte simétrica, el ratio de deformación o tensor de velocidad de deformación S , y la parte antisimétrica Ω , y se considera solo la distribución $S^2 + \Omega^2$, definidas en las Ecuaciones 3.38 y 3.39.

$$S^2 = \frac{J + J^T}{2} \quad (3.38)$$

$$\Omega^2 = \frac{J - J^T}{2} \quad (3.39)$$

El vórtice es definido entonces como una región conectada donde los valores propios de $S^2 + \Omega^2$ son negativos. Puesto que $S^2 + \Omega^2$ es real y simétrico, solo tendrá un valor propio real. Si este valor propio, al que denominaremos λ_2 , es negativo, este punto pertenecerá al núcleo de un vórtice. La efectividad de este método se ha comprobado a través de comparaciones con ejemplos analíticos y simulaciones DNS.

3.6.2. *Q-criterion*

El método *Q-criterion*, fue desarrollado por Jeong, Hussain en 1995 y, al igual que el método *Lambda2*, se utiliza para la detección de vórtices en el núcleo del campo de velocidad tridimensional de un flujo. Utiliza el segundo invariante positivo Jacobiano el cual puede observarse en la Ecuación 3.40

$$Q = J_{11}J_{22} - J_{12}J_{21} + J_{11}J_{33} - J_{13}J_{31} + J_{22}J_{33} - J_{23}J_{32} \quad (3.40)$$

El criterio de detección es el siguiente. Se resuelve la Ecuación 3.40 y se observa el signo de Q . Si $Q > 0$ implica que la presión local es menor que la presión de los alrededores. Esta condición puede ser derivada del polinomio característico del Jacobiano.

Este método es muy utilizado por la comunidad CFD, puede ser derivado por la vorticidad cinemática y necesita de una buena calidad de las derivadas, por lo que puede ser difícil de calcular.

Capítulo 4

Resultados

El capítulo siguiente se centrará en la exposición y el análisis de los resultados obtenidos tras los cálculos realizados en OpenFOAM con el fin de mostrar las diferencias obtenidas tras la utilización de los distintos modelos subgrid, así como de los dos métodos para la visualización de la turbulencia dentro del conducto en las dos geometrías de estudio. Se realizarán comparaciones de los distintos resultados obtenidos con el fin de poder observar visualmente las diferencias entre los casos de estudio. De esta manera se podrán obtener las conclusiones sobre los modelos subgrid utilizados, los cuales están explicados en la Sección 3.5, así como la diferencia entre los criterios de localización de turbulencia, explicados en la Sección 3.6.

De la misma forma se comparará el comportamiento del flujo en las distintas geometrías, comentando la aparición de turbulencia en cada una de ellas para llegar a unas conclusiones, las cuales se expresarán en el Capítulo 5.

4.1. Resultados de la simulaciones

En esta sección se reflejan los resultados obtenidos tras la realización de las simulaciones en OpenFOAM de las diferentes variables calculadas mediante el programa ParaView. Mediante estos resultados es posible la comparación de los distintos casos de estudio de este proyecto.

Las variables de flujo que se van a representar son:

- los campos de velocidad del fluido de las distintas geometrías.
- la vorticidad obtenida mediante el método *Lambda2*
- la vorticidad obtenida mediante el método *Q - criterion*

4.1.1. Campos de velocidad

En este apartado se muestran los resultados obtenidos referentes al campo de velocidades del flujo a lo largo de las dos geometrías de estudio del proyecto.

Para una buena visualización de estas se mostrarán dos perspectivas. La primera de ellas desde la sección de salida del conducto, y la segunda de ellas la sección longitudinal del conducto para observar el desarrollo del flujo a lo largo de este. Ambas perspectivas nos permitirán observar las diferencias entre los métodos utilizados para su posterior comparación. Todos los resultados se corresponden con el último paso temporal ya que es donde el flujo se encuentra más desarrollado.

Geometría simple

Los resultados obtenidos para la geometría simple en la sección transversal localizada a la salida del flujo se pueden observar en la Figura 4.1.

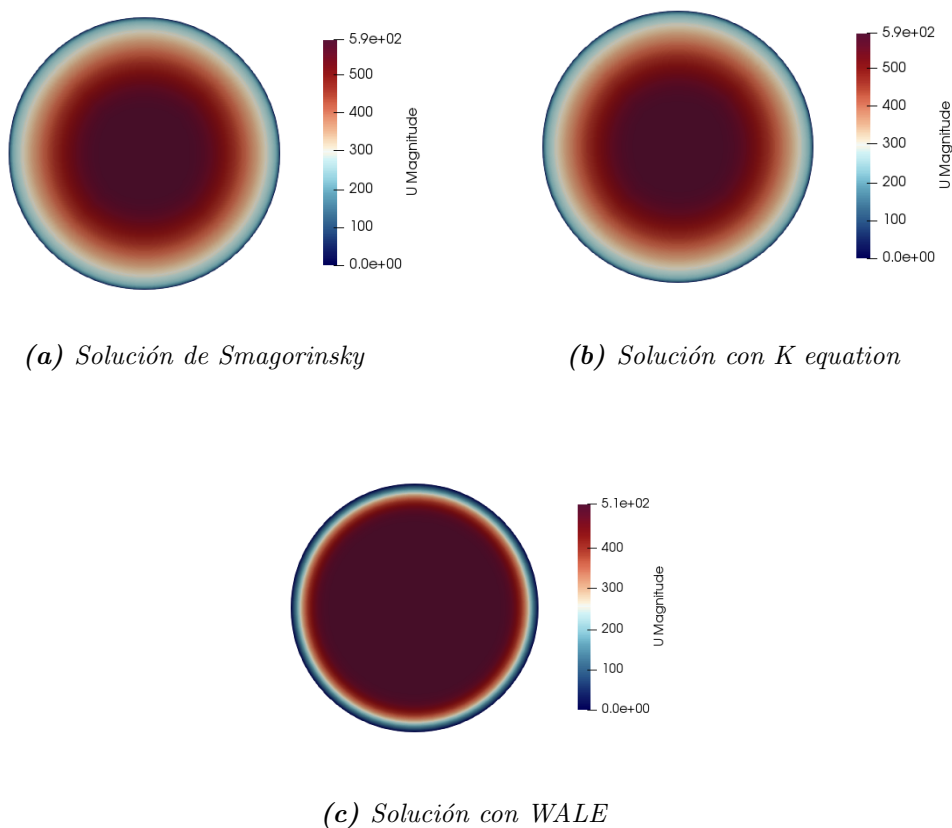


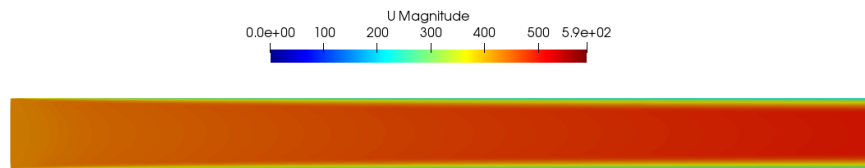
Figura 4.1: Campo de velocidades en la salida de la Geometría 1

Como se puede observar a simple vista, existen diferencias en el grosor de la capa límite en los resultados de los modelos utilizados en las simulaciones. En los resultados obtenidos mediante los modelos Smagorinsky y K equation, se puede ver como el grosor

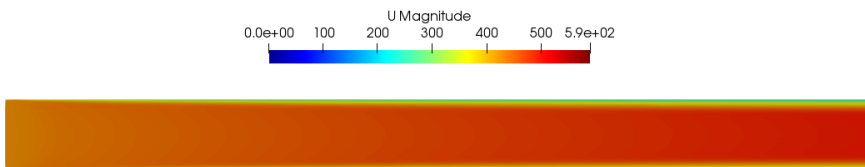
de esta capa límite es mayor que el obtenido en la simulación con el modelo WALE. Esta capa límite coincide en los dos primeros modelos ya que el modelado de la velocidad se realiza aplicando las mismas ecuaciones, diferenciándose únicamente en la inclusión de una ecuación para el equilibrio energético en la segunda de ellas, tal y como está explicado en la Sección 3.5. Por otra parte, el modelo WALE modela la velocidad de las zonas cercanas a la pared de una forma más efectiva que los modelos anteriores.

Si comparamos estos resultados con la teoría comentada, se puede ver como es el modelo WALE es el que más se acerca a la realidad, ya que nos encontramos ante un flujo turbulento (número de Reynolds cercano a 40.000) que entra en el conducto, por lo que se espera que el gradiente de velocidades sea mayor, es decir, que el espesor de capa límite sea menor tal y como se puede ver en la 4.4c, mientras que las soluciones con los modelos Smagorinsky y K equation corresponderían con un flujo laminar completamente desarrollado en el conducto.

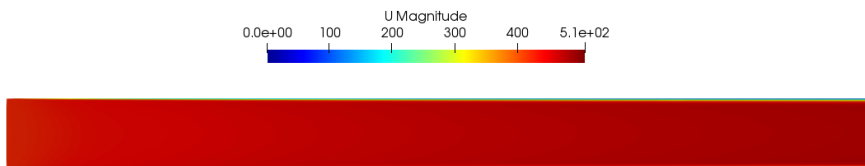
El desarrollo de la capa límite a lo largo de la sección longitudinal puede observarse en la Figura 4.2. En ella se puede ver cómo la capa límite se encuentra totalmente desarrollada en la parte final del conducto en los resultados de los distintos modelos utilizados, así como la diferencia de grosor comentada previamente.



(a) Solución de Smagorinsky



(b) Solución con K equation

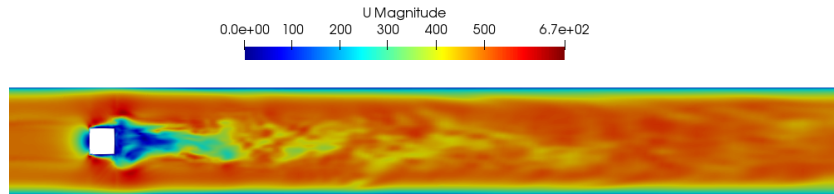


(c) Solución con WALE

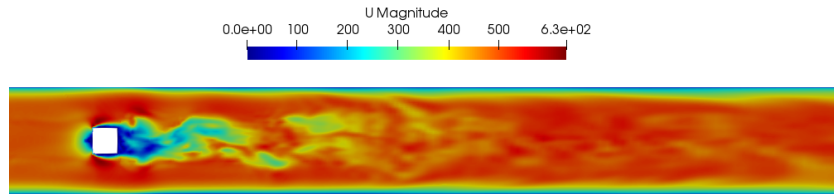
Figura 4.2: Campo de velocidades en el eje longitudinal de la Geometría 1

Geometría con cuerpo de sección cuadrada en el interior

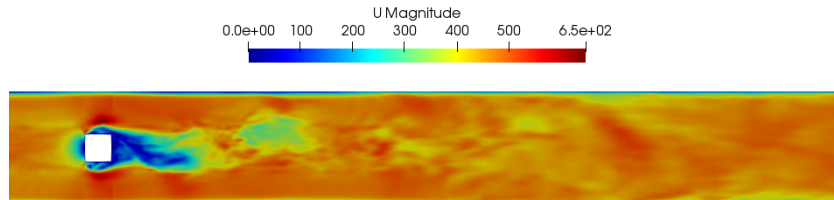
Los resultados para el perfil de velocidades en el plano longitudinal se observan en la Figura 4.3. En ella se puede ver la perturbación producida por el cuerpo de sección cuadrada presente en el interior del conducto en el fluido que entra con velocidad constante.



(a) Solución de Smagorinsky



(b) Solución con K equation



(c) Solución con WALE

Figura 4.3: Campo de velocidades en el eje longitudinal de la Geometría 2

Como se puede observar, la velocidad máxima se encuentra en los tres casos en la misma sección del conducto, situado en la zona donde se encuentra el cuerpo. Esto es debido a la reducción del área, lo que produce que por el teorema de conservación de la masa la velocidad aumente. Así mismo se puede observar como se originan vórtices en la parte trasera del cuerpo y que estos se van disipando a lo largo de la sección, tendiendo el fluido a recuperar su estado laminar.

A pesar de que se encuentran en el mismo paso temporal, se observa diferencia en el perfil de velocidades de los vórtices. Esto es debido a la característica aleatoria de la turbulencia, que hace que la solución sea distinta para cada simulación.

Los resultados obtenidos para la segunda geometría presente en el estudio en la sección transversal localizada en la salida del conducto se puede observar en la Figura 4.4. En esta figura se puede observar como afecta la presencia de estos vórtices a la capa límite, haciendola no homogénea a lo largo de la sección transversal. Del mismo modo que se ha comentado en el caso de la geometría simple, se puede observar como la capa límite sigue teniendo más espesor en el caso de las simulaciones en las que se emplean los modelos *Smagorinsky* y *K equation*.

Si comparamos las velocidades máximas que se alcanzan, podemos ver como estas son muy parecidas, siendo mayor en el caso de la solución del modelo *K equation*.

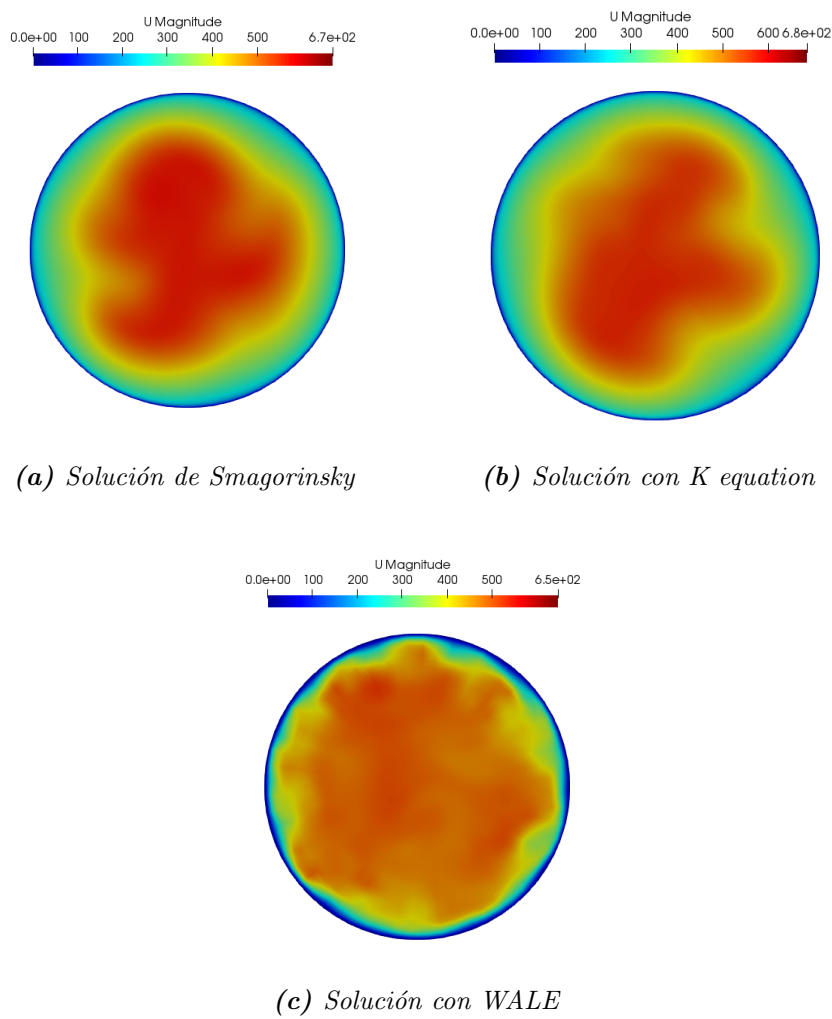


Figura 4.4: Campo de velocidades en la salida de la Geometría 2

4.1.2. Vorticidad con método *Lambda2*

En este apartado se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación del método *Lambda2* para la localización de los vórtices en las geometrías de estudio.

Al igual que en apartado anterior, para una buena visibilización de los resultados se muestran dos perspectivas distintas, la sección transversal a la salida del conducto y la sección longitudinal del mismo para observar la evolución del flujo a lo largo del eje x . Todos los resultados mostrados corresponden con el último paso temporal para mostrar el flujo totalmente desarrollado.

Geometría simple

Los resultados obtenidos para la geometría simple en la sección transversal localizada a la salida del conducto se pueden observar en la Figura 4.5. En ella se puede observar como en el método *WALE* existen vórtices en la capa límite, aunque si comparamos estos con los presentes en la entrada, tienen una intensidad 10000 veces menor, por lo que serán despreciables.

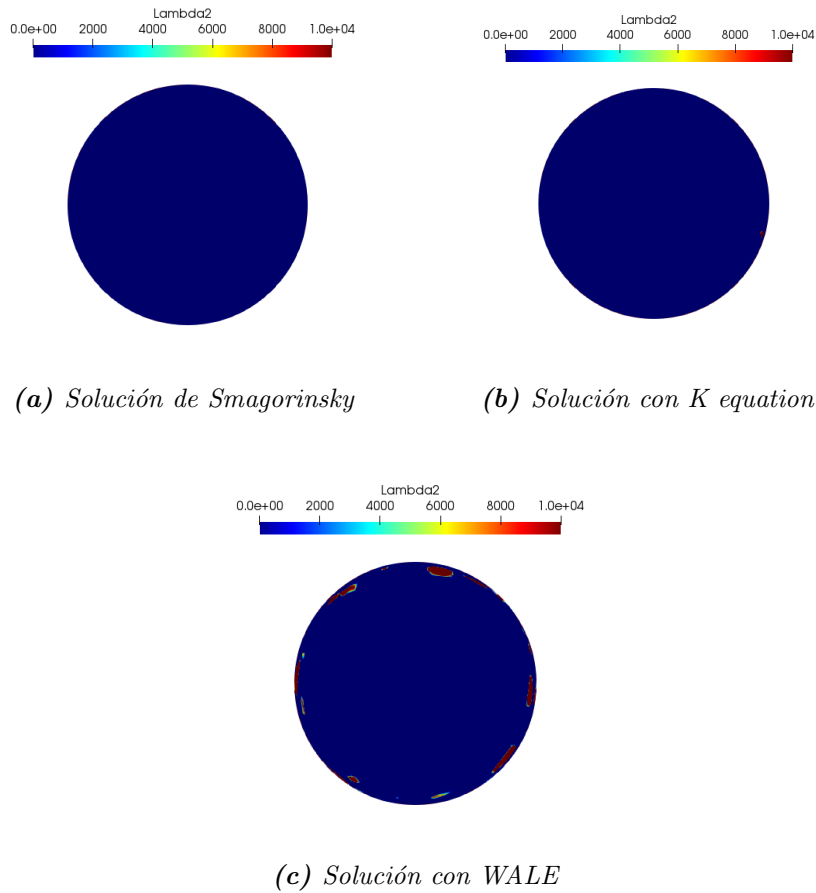
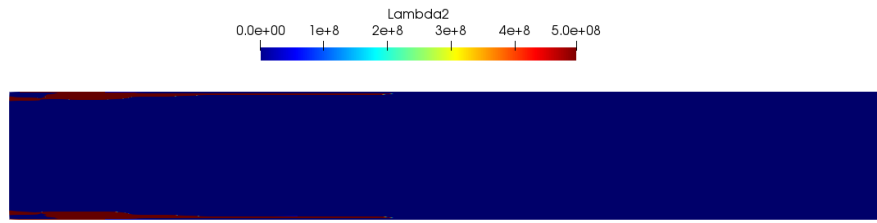
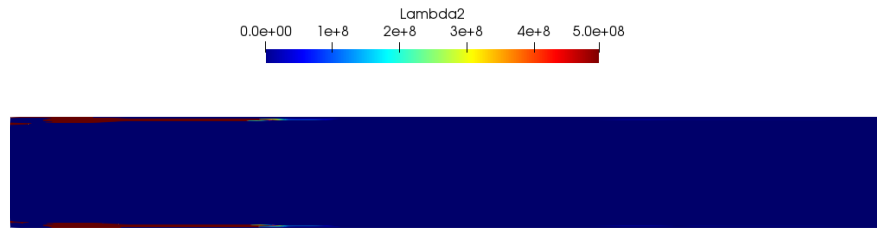


Figura 4.5: Vorticidad en la salida de la Geometría 1 método *Lambda 2*

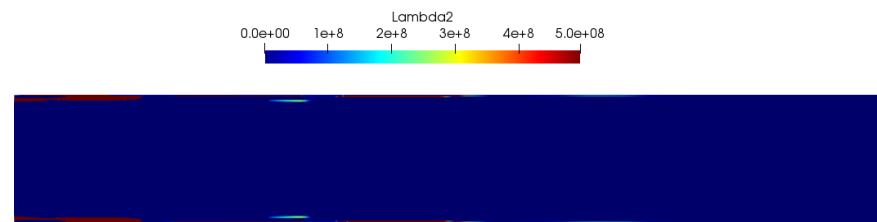
Se puede observar como en este caso los vórtices se concentran en la entrada del conducto, en la zona donde se comienza la aparición de la capa límite. Estos resultados son coherentes con respecto a la teoría mencionada en el Capítulo 2, ya que, en este caso, no existe nada que genere vorticidad a lo largo del conducto, por lo que el fluido tenderá a mantener su comportamiento laminar a lo largo del conducto, manteniendo su perfil de velocidad constante una vez se ha desarrollado el flujo por completo, siendo la única zona susceptible a generar vorticidad aquella que se encuentra en contacto con la superficie del conducto.



(a) Solución de Smagorinsky



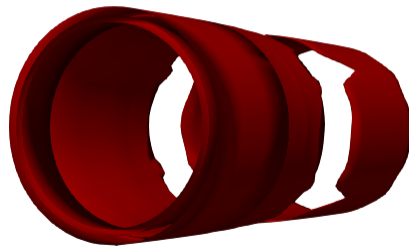
(b) Solución con K equation



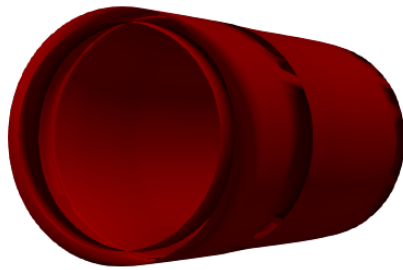
(c) Solución con WALE

Figura 4.6: Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 1 método Lambda 2

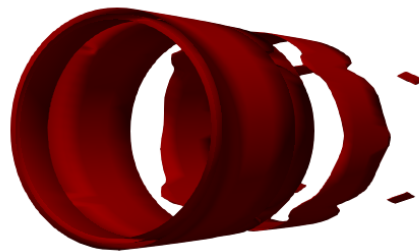
Esto puede observarse mejor en la Figura 4.7, en la que se observa una imagen en tres dimensiones de los vórtices que aparecen en el conducto, y cómo estos se concentran en la entrada de este, disipándose a lo largo de la geometría. Comparando los resultados, se puede observar cómo en la solución de WALE, estos vórtices se disipan antes que en las soluciones de Smagorinsky y K equation.



(a) *Solución de Smagorinsky*



(b) *Solución con K equation*

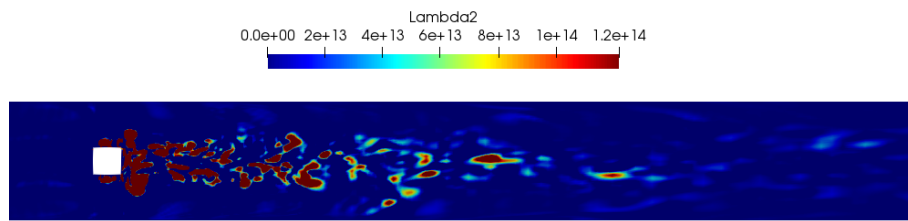


(c) *Solución con WALE*

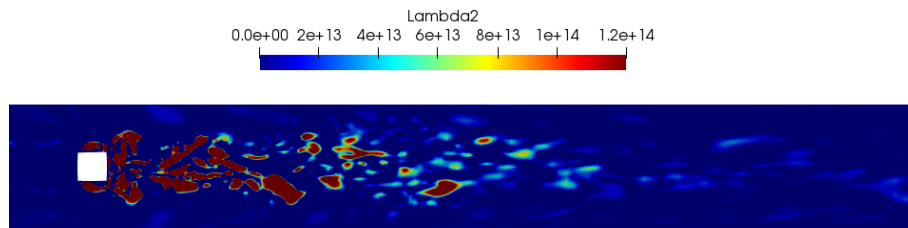
Figura 4.7: *Vorticidad en 3D de la Geometría 1 método Lambda 2*

Geometría con cuerpo de sección cuadrada en el interior

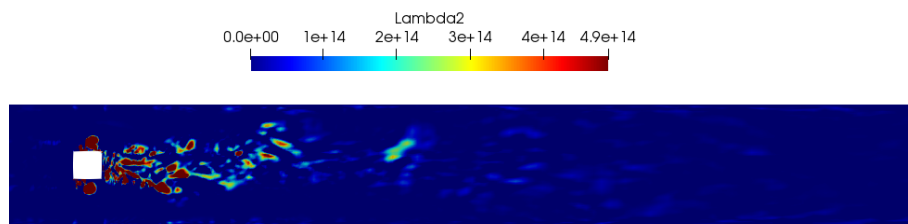
En la Figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el Q -criterion en el conducto circular con un cuerpo de sección cuadrada en el interior del mismo. Como se puede observar existendiferencias en cuanto al método utilizado para su simulación, aunque los tres resultados siguen la misma dinámica. En ellas se puede ver cómo los vórtices se crean en las zonas más cercanas al cuerpo de sección cuadrada y se van disipando a lo largo del conducto haciendose estos de menor tamaño e intensidad.



(a) Solución de Smagorinsky



(b) Solución con K equation

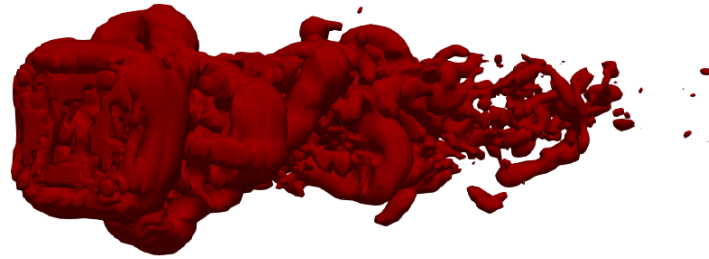


(c) Solución con WALE

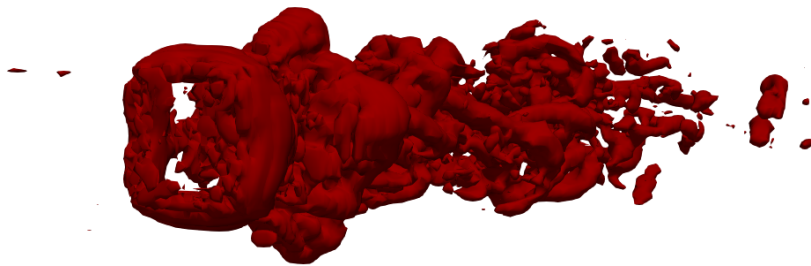
Figura 4.8: Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 2 método Lambda 2

En esta figura (Figura 4.8), también se puede observar cómo la interacción entre la capa límite y el flujo turbulento originado por el cuerpo de sección cuadrada genera vórtices en las paredes del conducto, los cuales no existían en el conducto de la primera geometría en el que no estaba presente el cuerpo de sección cuadrada. Estos vórtices tienen menor intensidad y son de menor tamaño que los generados por el propio cuerpo. Se puede observar una visualización de los vórtices en 3D en la Figura 4.9.

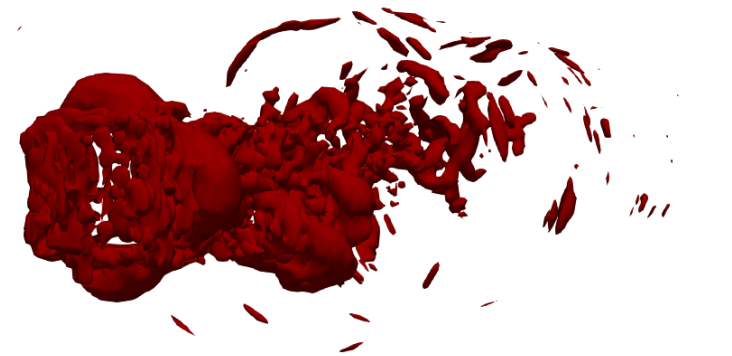
En la figura 3D se pueden observar los vórtices originados por la presencia del cuerpo de sección cuadrada en el interior del conducto. Si se comparan los resultados obtenidos, se puede ver una gran semejanza entre las soluciones obtenidas mediante *Smagorinsky* y *K equation*, mientras que en el caso de la solución *WALE*, los vórtices obtenidos en las paredes del conducto por interacción con la capa límite presentan una mayor intensidad e importancia.



(a) Solución de Smagorinsky



(b) Solución con K equation



(c) Solución con WALE

Figura 4.9: Vorticidad en 3D de la Geometría 2 método Lambda 2

Los resultados obtenidos para la segunda geometría en la sección transversal situada a la salida del conducto se observan en la Figura 4.10. Como se puede observar los vórtices generados por el cuerpo se han disipado casi en su totalidad al llegar a la salida del conducto, por lo que se observan en las tres simulaciones vórtices de una intensidad baja, siendo mayor la intensidad obtenida en el caso de la simulación con el *subgrid WALE* en las zonas cercanas a la pared del conducto.

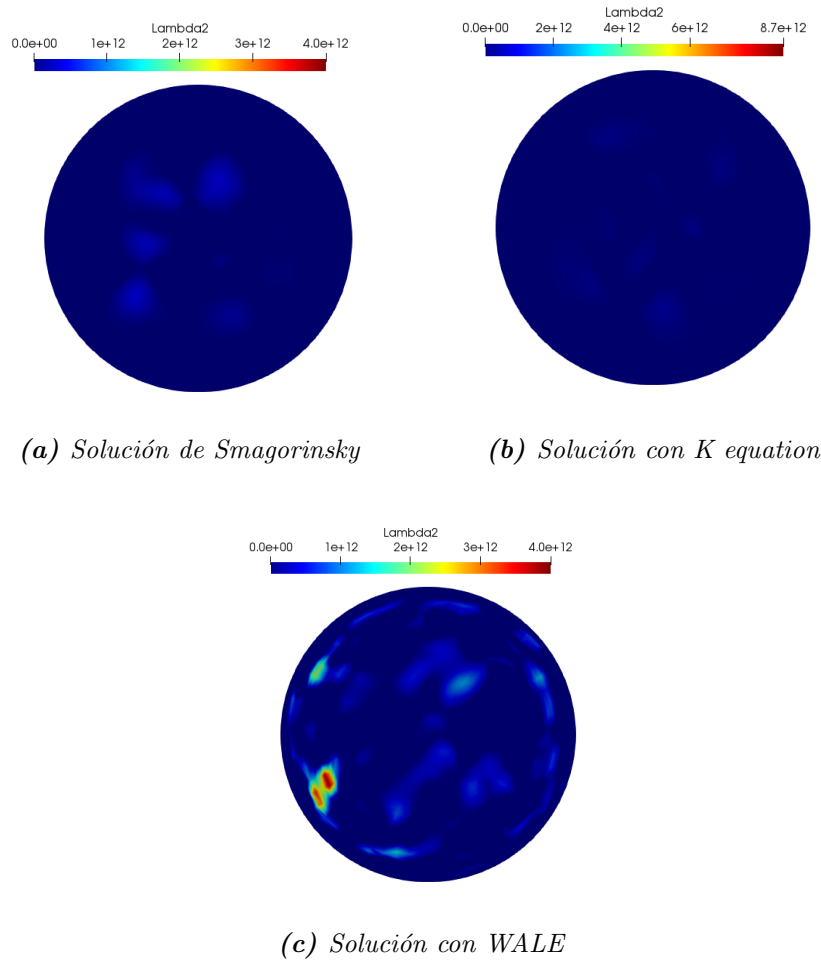


Figura 4.10: Vorticidad en la salida de la Geometría 2 método Λ^2

4.1.3. Vorticidad con el método Q - *criterion*

En este apartado se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el modelo Q - *criterion* explicado en la Sección 3.6 para la localización de vórtices en el interior del conducto en las dos geometrías presentes en el estudio.

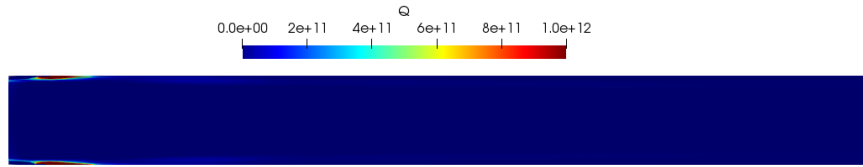
Al igual que en los apartados anteriores, con el fin de presentar una buena visibilización de los resultados, se decide mostrar dos perspectivas distintas de las geometrías estudiadas. La primera de ellas la sección transversal del conducto a la salida del mismo para poder observar el flujo completamente desarrollado, y la segunda de ellas la sección

longitudinal, para poder observar el desarrollo del flujo a lo largo del eje longitudinal de las dos geometrías de estudio.

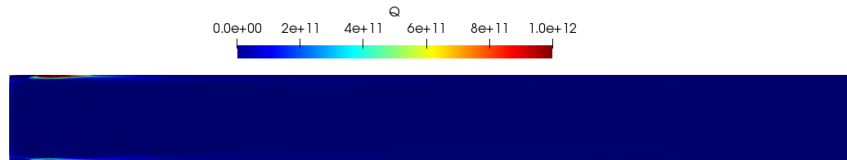
Al igual que en apartado anterior, para una buena visibilización de los resultados se muestran dos perspectivas distintas, la sección transversal a la salida del conducto y la sección longitudinal del mismo para observar la evolución del flujo a lo largo del eje x . Todos los resultados mostrados corresponden con el último paso temporal para mostrar el flujo totalmente desarrollado.

Geometría simple

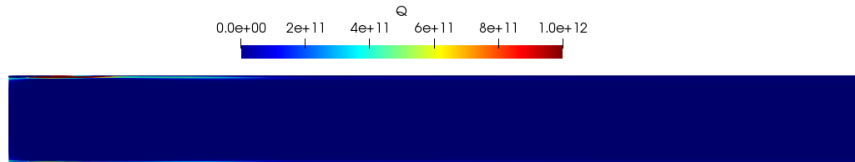
Seguidamente se muestran los resultados de la vorticidad en la Geometría 1 obtenidos con la función Q - *criterion*. En la figura Figura 4.12, se puede observar la sección longitudinal de la geometría. En esta se puede observar, al igual que en los resultados obtenidos con el método *Lambda2*, cómo los vórtices están presentes en la sección de entrada de la figura y desaparecen a lo largo del conducto, tal y como se explica en la teoría del Capítulo 2.



(a) *Solución de Smagorinsky*



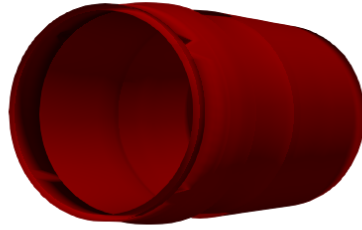
(b) *Solución con K equation*



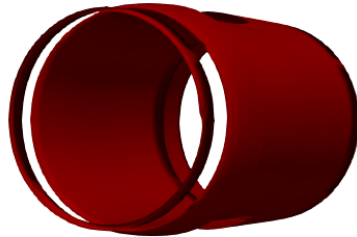
(c) *Solución con WALE*

Figura 4.11: Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 1 método Q - *criterion*

Se presenta una imagen en tres dimensiones del comportamiento de los vórtices según el método Q - *criterion*. En esta figura se puede observar cómo la vorticidad se concentra en la entrada, tal y como se ha comentado previamente, y desaparece en cuanto la capa límite está completamente desarrollada.



(a) *Solución de Smagorinsky*



(b) *Solución con K equation*



(c) *Solución con WALE*

Figura 4.12: Vorticidad en 3D de la Geometría 1 método Q - *criterion*

Por último, se muestra la sección transversal a la salida del conducto (Figura 4.13) en la que se puede observar como los vórtices se han disipado completamente ya que la capa límite se encuentra totalmente desarrollada.

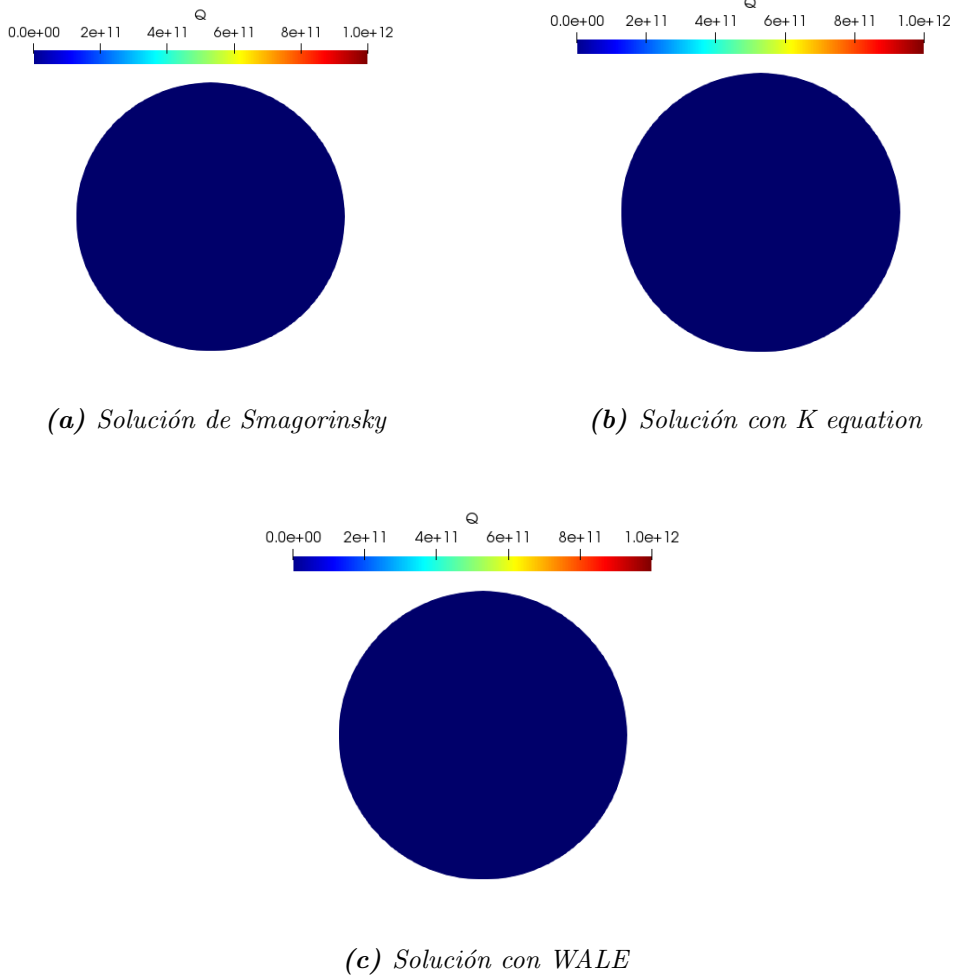


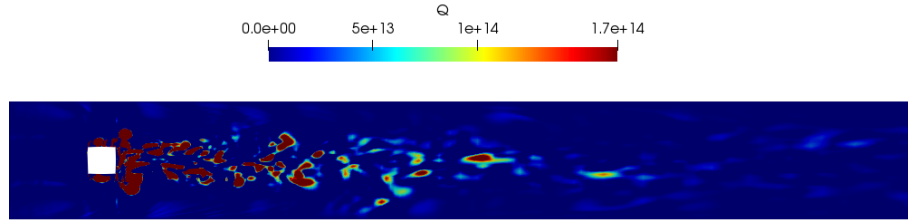
Figura 4.13: Vorticidad en la salida de la Geometría 1 método Q - criterion

Geometría con cuerpo de sección cuadrada en el interior

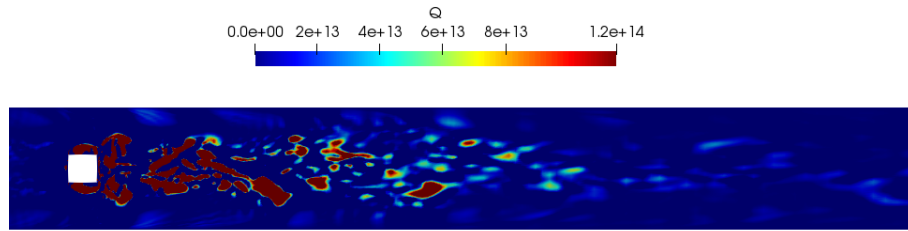
A continuación se muestran los resultados de la vorticidad en la Geometría 2 con la función de postproceso Q - criterion. En la Figura 4.14 se puede observar cómo, al igual que se ha obtenido con el método *Lambda 2*, los vórtices se generan al chocar el fluido con el cuerpo de sección cuadrada si van perdiendo intensidad y tamaño conforme avanzan a través del conducto.

En este caso se puede observar la principal diferencia con el método *Lambda 2* en las zonas más cercanas a la pared, en la que este método se observa con más claridad la aparición de vórtices en la capa límite debido a la interacción del flujo turbulento con la capa límite en las tres simulaciones, mientras que con el método *Lambda 2* estos

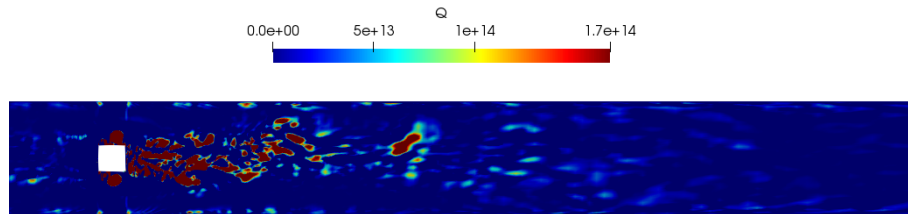
vórtices son de una intensidad y un tamaño despreciables.



(a) Solución de Smagorinsky



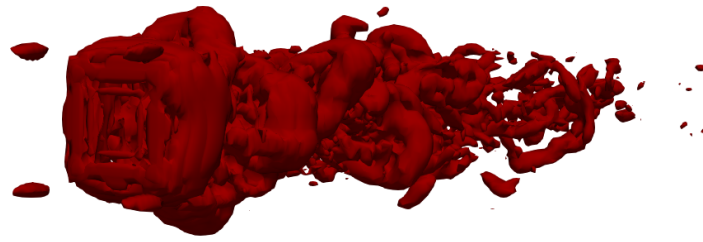
(b) Solución con *K equation*



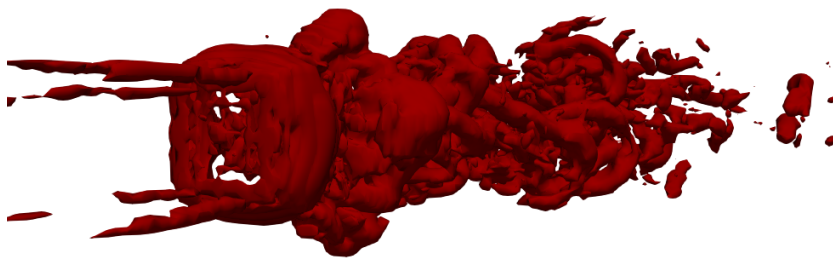
(c) Solución con *WALE*

Figura 4.14: Vorticidad en el eje longitudinal de la Geometría 2 cmétodo *Q - criterion*

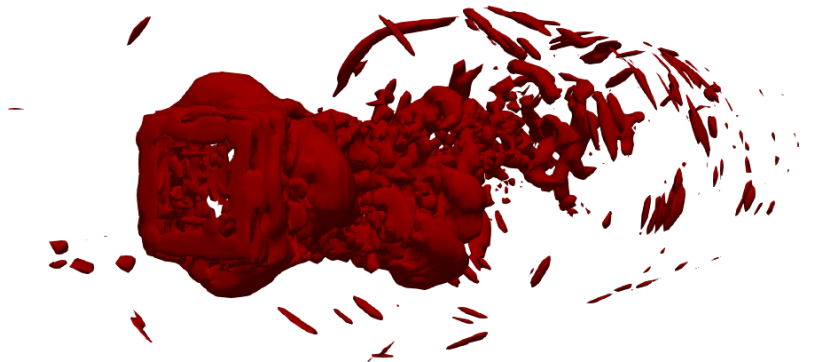
Se puede observar una imagen 3D de los vórtices obtenidos con el método *Q - criterion* en la Figura 4.15. Del mismo modo que ocurre con el método *Lambda 2* para la localización de los vórtices, se puede observar gran semejanza entre las soluciones de *Smagorinsky* y *K equation*, mientras que en la solución obtenida con *WALE* se observa que los vórtices presentes en la capa límite adquieren mayor importancia e intensidad, apareciendo representados junto con los vórtices generados por el cuerpo de sección cuadrada presente en el interior del conducto.



(a) *Solución de Smagorinsky*



(b) *Solución con K equation*

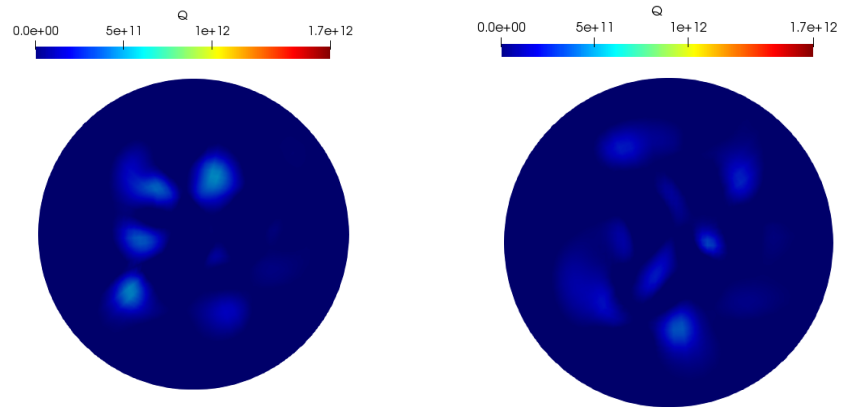


(c) *Solución con WALE*

Figura 4.15: *Vorticidad en 3D de la Geometría 2 método Q - criterion*

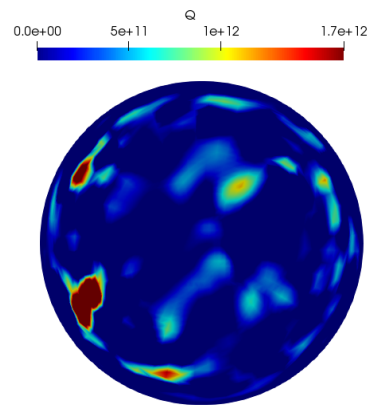
Observando la Figura 4.16, se puede ver como los vórtices pierden intensidad a la salida del conducto, llegando a ser casi imperceptibles en el caso de los resultados obtenidos con los métodos *Smagorinsky* y *K equation*, mientras que en la solución obtenida mediante el método *WALE* se puede observar cómo estos vórtices no han perdido tanta intensidad en las partes cercanas a la capa límite, aunque si lo se compara con los vórtices obtenidos en la sección longitudinal, estos son de un orden de magnitud

100 veces menor.



(a) Solución de Smagorinsky

(b) Solución con K equation



(c) Solución con WALE

Figura 4.16: Vorticidad en la salida de la Geometría 2 método Q - criterion

4.2. Velocidad promedio

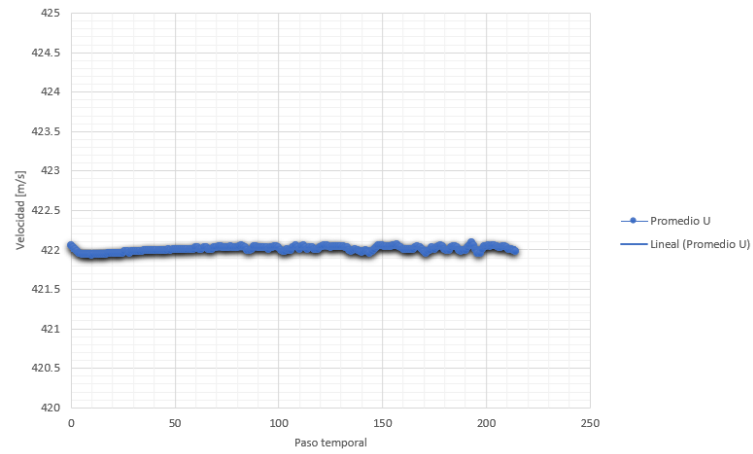
En el siguiente apartado del presente trabajo se mostrarán las velocidades promedio obtenidas en dos secciones distintas de la segunda geometría de estudio. La primera sección que se presentará será la sección de salida del conducto, mostrando la variación del módulo de la velocidad con respecto a el tiempo, como la variación de las tres componentes que la componen.

4.2.1. Velocidad promedio a la salida del conducto

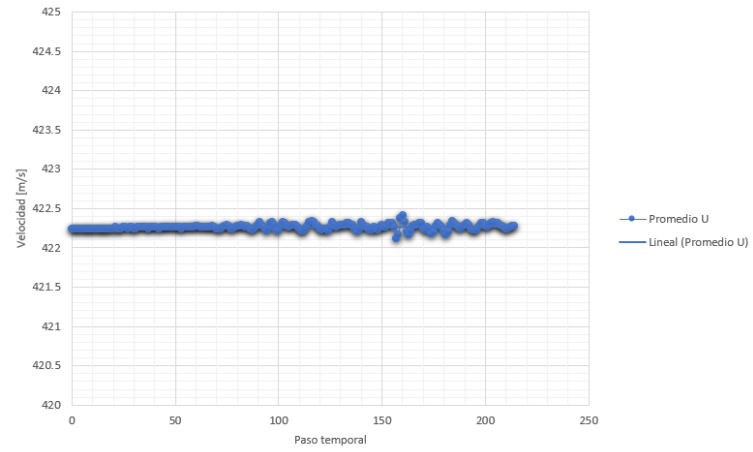
En la Figura 4.17 se puede observar la variación de la velocidad promedio para cada una de las soluciones calculadas. Como se puede observar, en los primeros pasos temporales esta variación es nula en los tres resultados obtenidos. Sin embargo, observamos una oscilación en el valor de la velocidad promedio a partir de los cien pasos temporales, la cual es más importante en la solución obtenida con el modelo *WALE* que para los otros dos modelos en los que esta variación es casi imperceptible.

Por otro lado, si se observa la variación de la velocidad en el *eje x*, presente en la Figura 4.18, se puede ver como esta es prácticamente igual a la variación presente en el módulo de la velocidad, lo que muestra que es en esta dirección donde se encuentra la componente más importante de la velocidad.

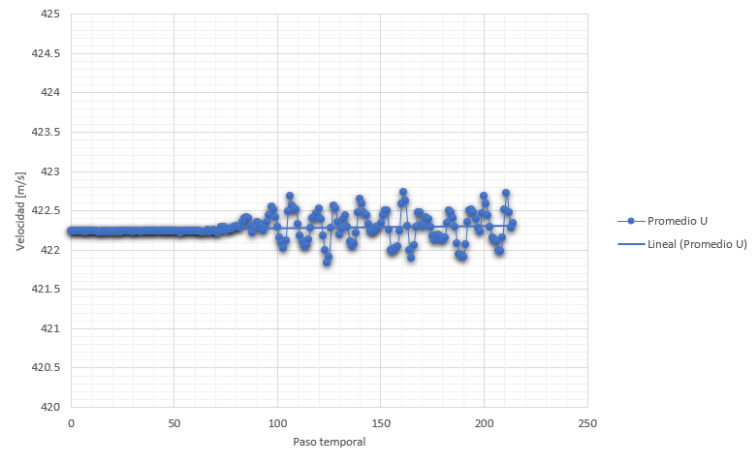
Por último, se puede observar la variación de las componentes de la velocidad en los *ejes z e y* en la Figuras 4.19 y 4.20. Se puede observar que se mantiene constante y con un valor muy cercano a cero hasta los cien pasos temporales, donde se aprecia una oscilación alrededor de un valor medio cercano a cero. Esta variación presente en ambos ejes es muy pequeña comparado con la velocidad en el *eje x*, por lo que puede considerarse despreciable.



(a) Solución de Smagorinsky

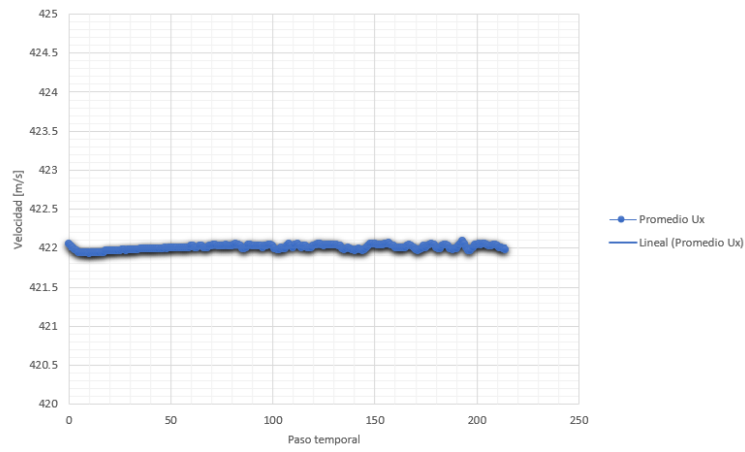


(b) Solución con K equation

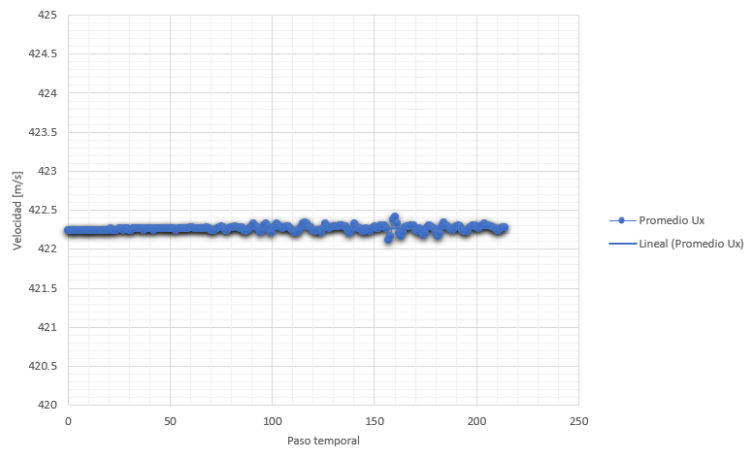


(c) Solución con WALE

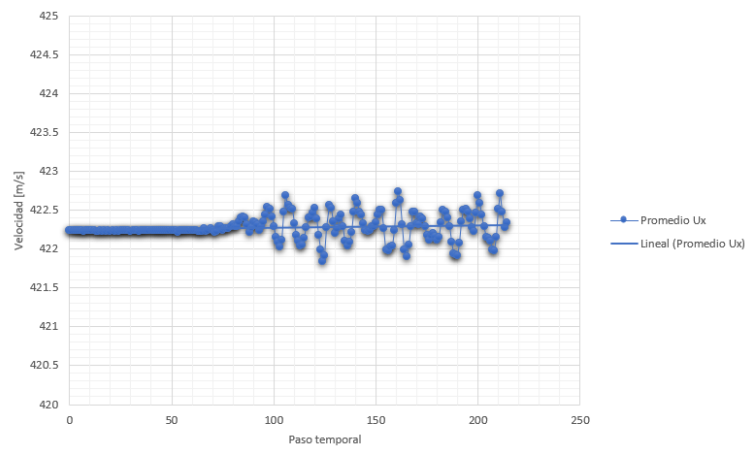
Figura 4.17: Variación del promedio del módulo de la velocidad a lo largo del tiempo a la salida del conducto



(a) Solución de Smagorinsky

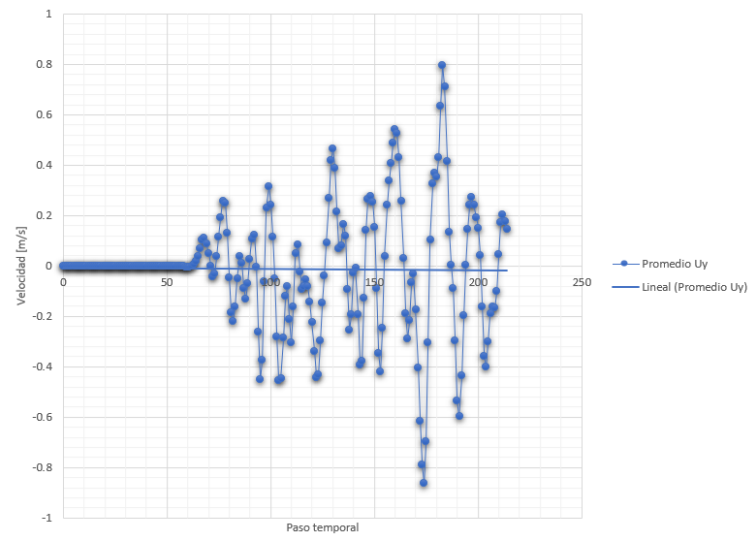


(b) Solución con K equation

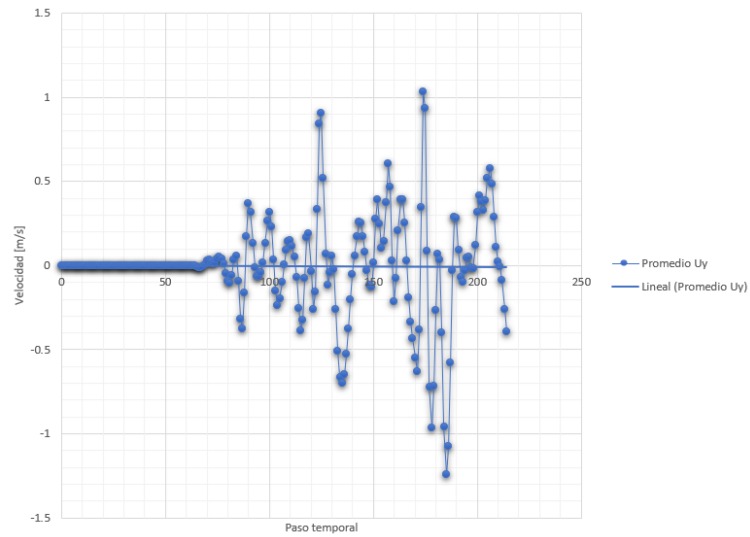


(c) Solución con WALE

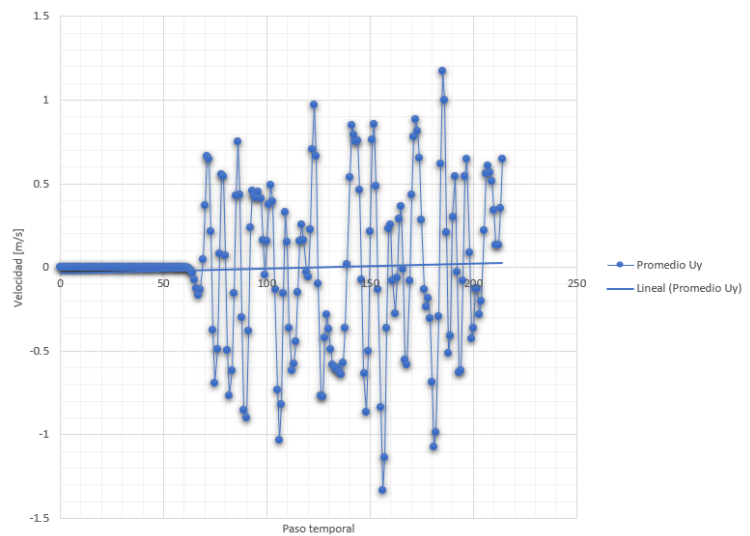
Figura 4.18: Variación del promedio de la velocidad en el eje x a lo largo del tiempo a la salida del conducto



(a) Solución de Smagorinsky



(b) Solución con K equation



(c) Solución con WALE

Figura 4.19: Variación del promedio de la velocidad en el eje y a lo largo del tiempo a la salida del conducto

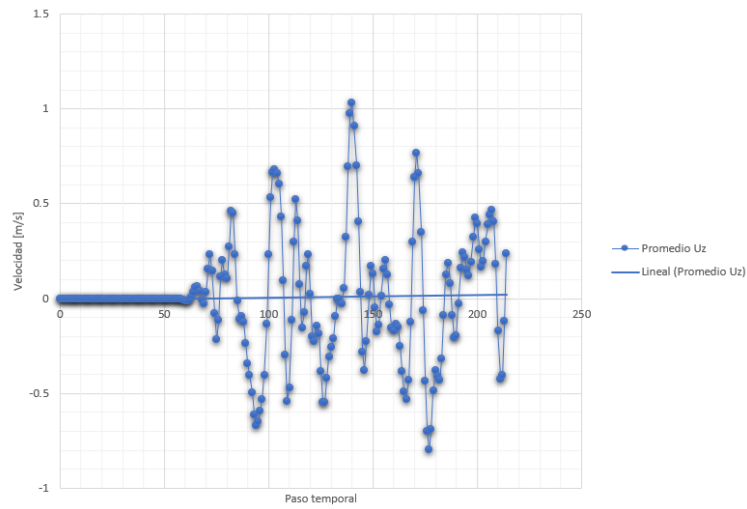
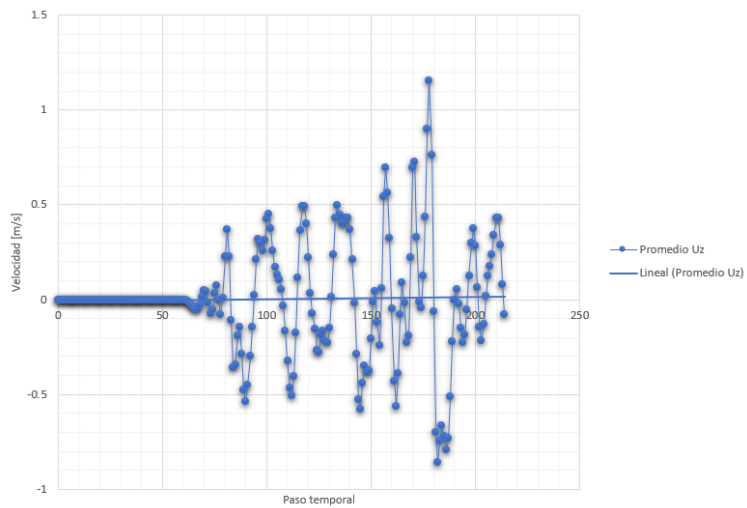
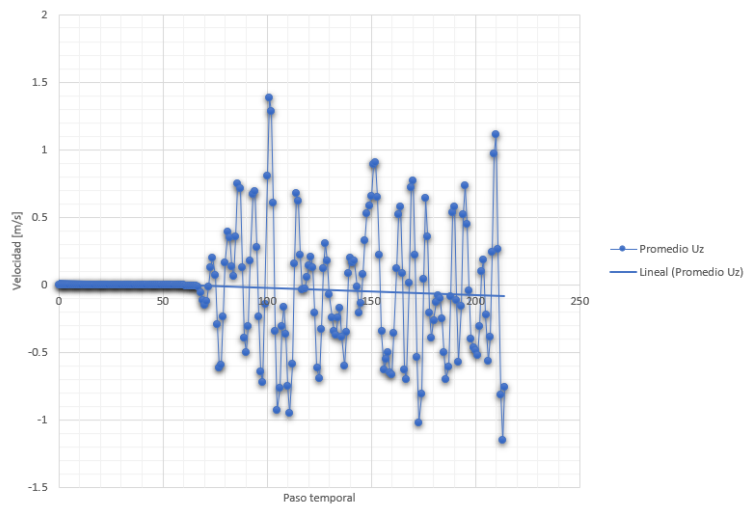
(a) *Solución de Smagorinsky*(b) *Solución con K equation*(c) *Solución con WALE*

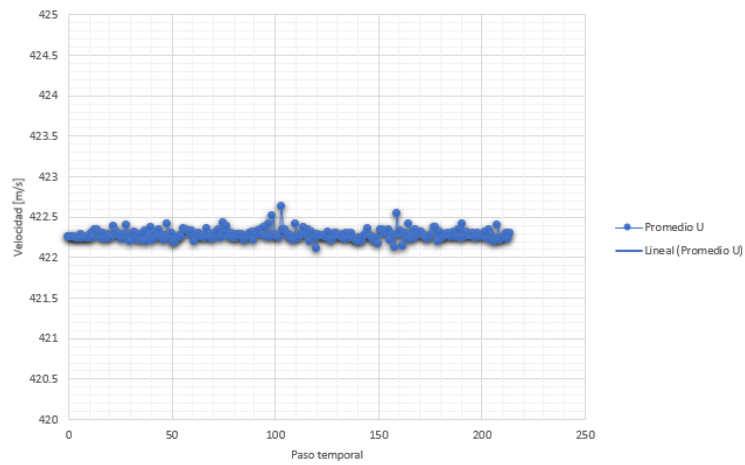
Figura 4.20: Variación del promedio de la velocidad en el eje z a lo largo del tiempo a la salida del conducto

4.2.2. Promedio de velocidades en la estela del cuerpo de sección cuadrada

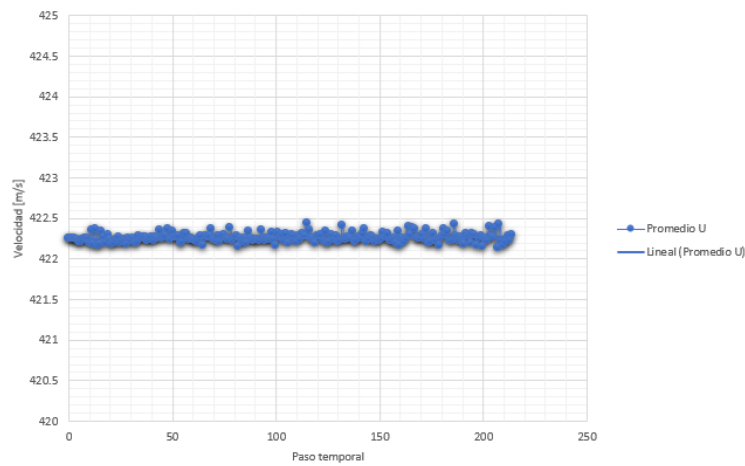
En este caso, se puede observar en la Figura 4.21 como la variación en el módulo de la velocidad se produce desde el primer paso temporal y que este es de mayor magnitud que el presente a la salida del conducto. Del mismo modo que en la solución obtenida a la salida del conducto, se observa como la variación de la componente de la velocidad en el *eje* x , presente en la Figura 4.22, es muy similar a la variación presente en el módulo de la velocidad a lo largo del tiempo.

Por otro lado, se puede observar que la variación en las componentes de la velocidad en los *ejes* z e y , representados en las Figuras 4.23 y 4.24, tienen más importancia que a la salida del conducto, ya que en este caso alcanzan valores del orden de 10^1 . Por lo tanto, se puede observar como el flujo tiende a frenar al fluido en las direcciones z e y , lo que favorece a la laminación del flujo y a la pérdida de las estructuras turbulentas a lo largo de la geometría.

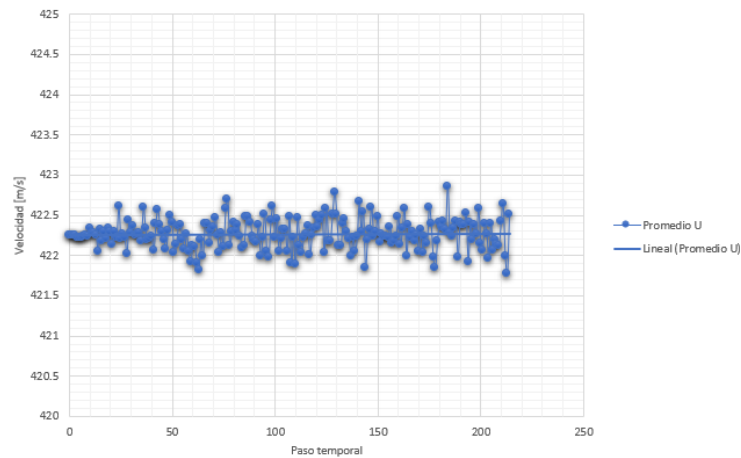
Del mismo modo que ha sido comentado en el apartado anterior, la variación de en todos los ejes es mayor en el modelo *WALE* que en los otros dos modelos.



(a) Solución de Smagorinsky

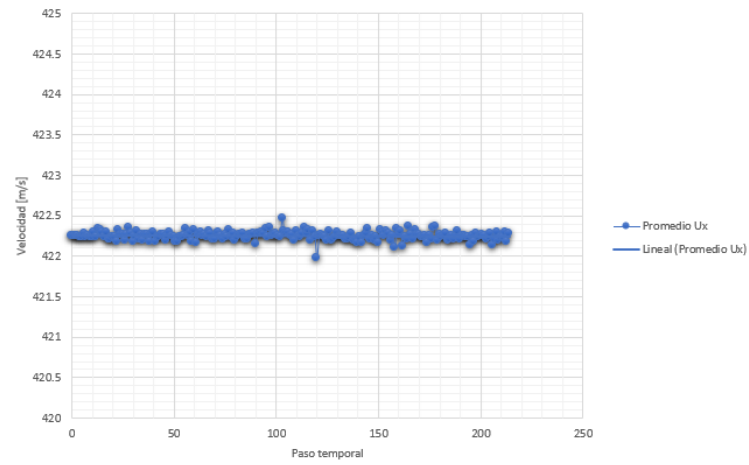


(b) Solución con K equation

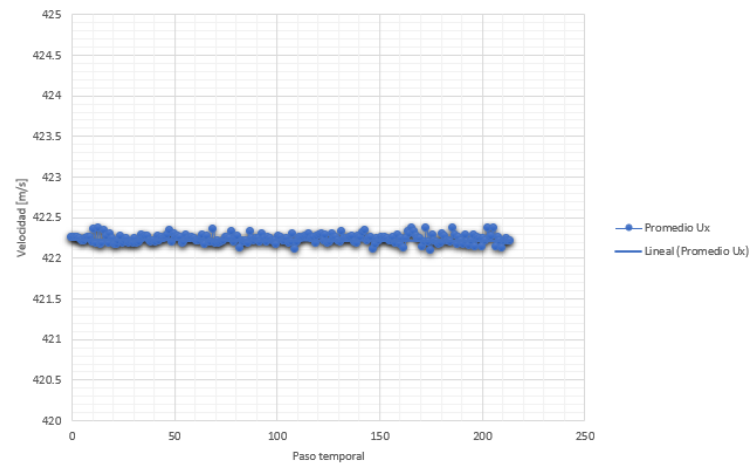
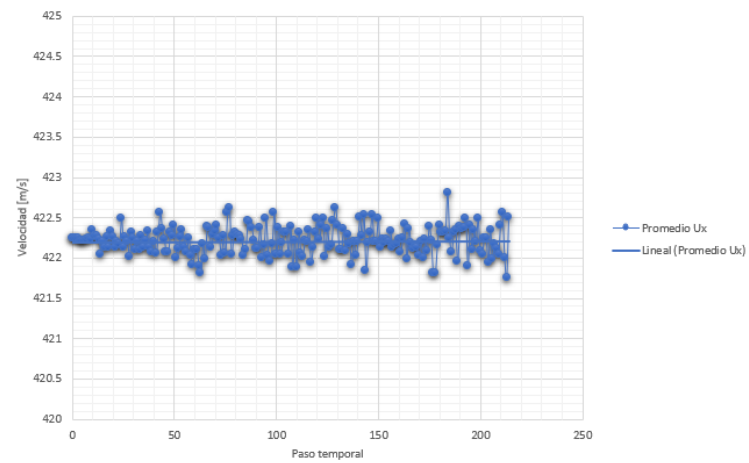


(c) Solución con WALE

Figura 4.21: Variación del promedio del módulo de la velocidad a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cadrada

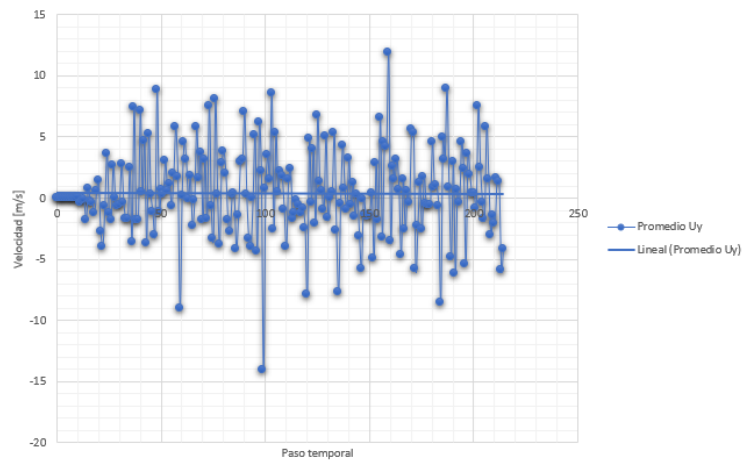


(a) Solución de Smagorinsky

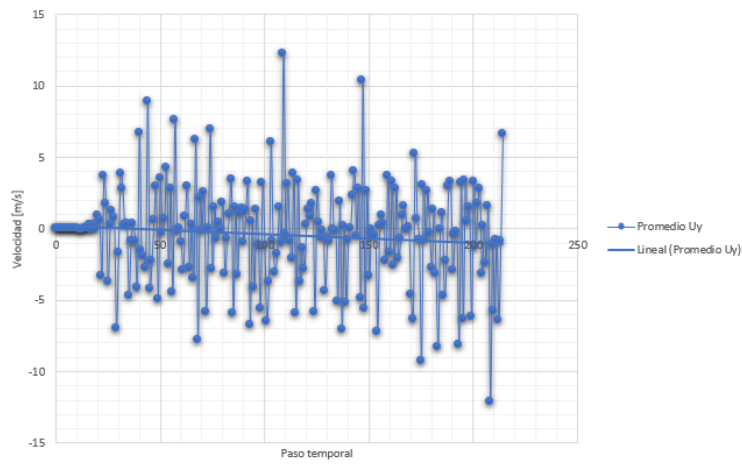
(b) Solución con K equation

(c) Solución con WALE

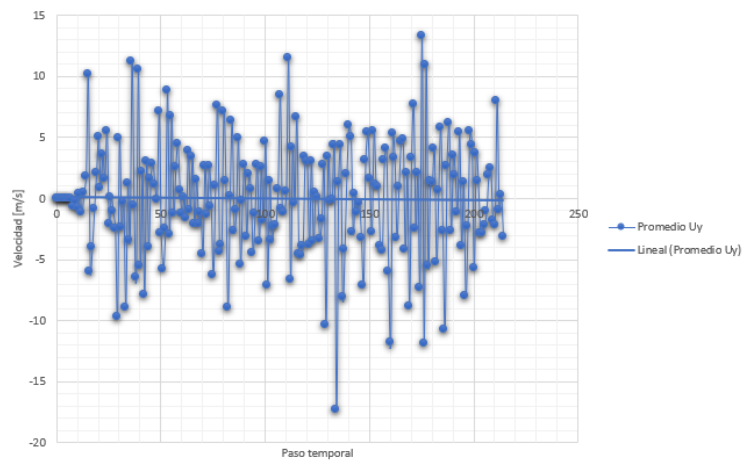
Figura 4.22: Variación del promedio de la velocidad en el eje x a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cuadrada



(a) Solución de Smagorinsky

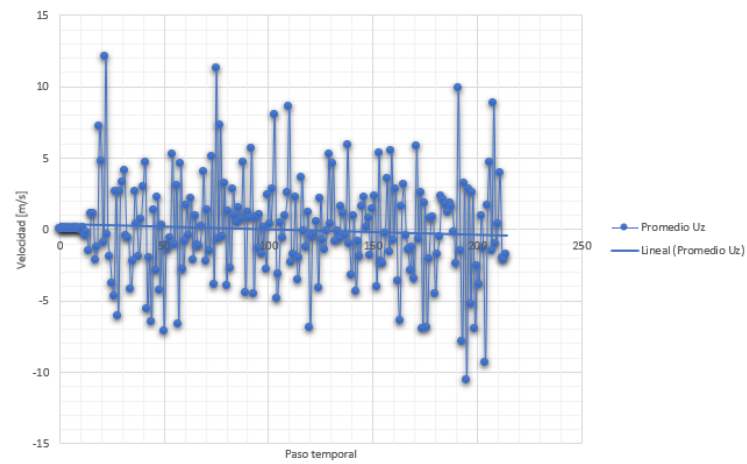


(b) Solución con K equation

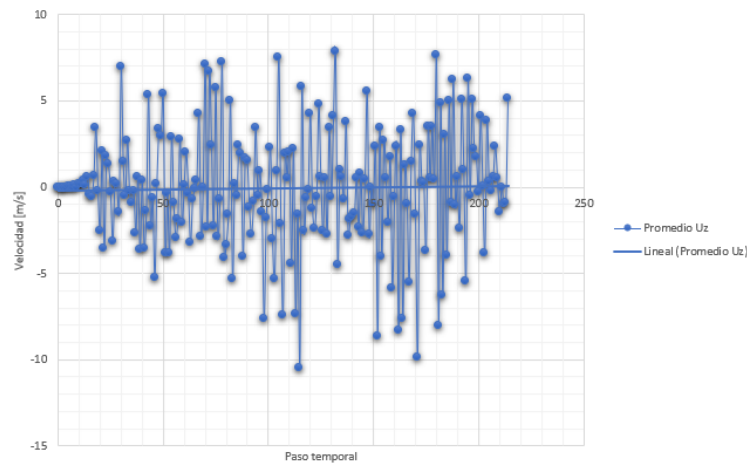


(c) Solución con WALE

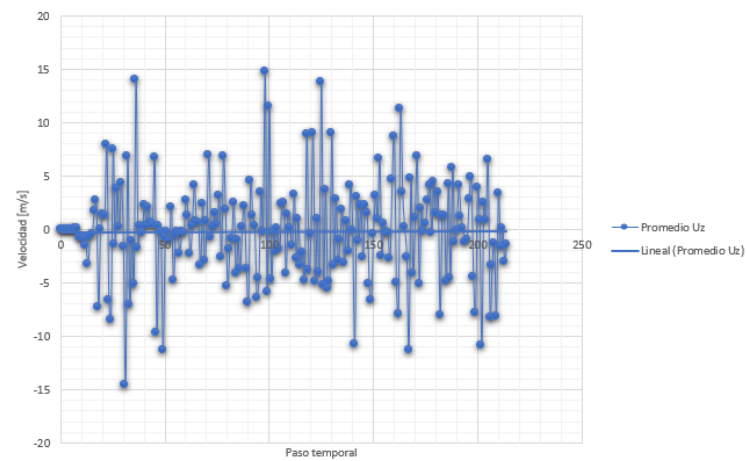
Figura 4.23: Variación del promedio de la velocidad en el eje y a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cadrada



(a) Solución de Smagorinsky



(b) Solución con K equation



(c) Solución con WALE

Figura 4.24: Variación del promedio de la velocidad en el eje z a lo largo del tiempo en la estela del cuerpo de sección cadrada

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Introducción

A lo largo de las diferentes secciones que conforman este trabajo se han expuesto los distintos estudios realizados para observar el comportamiento del flujo turbulento que entra en un conducto de sección circular en dos tipos de geometría mediante técnicas CFD. En el capítulo anterior se recogen los resultados obtenidos y en este se recopilan cada una de las conclusiones obtenidas y se pretende reflejar los estudios futuros previstos relacionados con este tema.

5.2. Conclusiones

El objetivo principal del trabajo ha sido conocer el comportamiento del flujo confinado entre paredes y la comparación de los distintos modelos *subgrid* utilizados para la resolución del problema propuesto, así como la comparación de las dos funciones de postproceso utilizadas a lo largo del mismo. Del trabajo realizado se derivan las siguientes conclusiones:

- El tamaño de la geometría y la malla utilizadas son suficientes para llevar a cabo el estudio.
- No es posible la generación de turbulencia a lo largo del conducto sin la presencia de un generador de turbulencia, representado en este caso en la segunda geometría por el cuerpo de sección transversal cuadrada, tal y como se adelantaba en la introducción del trabajo. Pueden existir otros métodos para la generación de turbulencia, mediante la utilización de herramientas externas.
- Los modelos *subgrid* de *Smagorinsky* y *K equation* muestran resultados muy similares a la hora de resolver el grosor de la capa límite y el perfil de velocidades en el interior del conducto, tanto en el caso de la geometría simple, sin ningún obstáculo en el interior, como en el caso de la segunda geometría con el cuerpo

de sección cuadrada en el interior. Por otro lado, el modelo *WALE*, realiza una mejor resolución del flujo cercano a la pared, obteniendo un espesor de la capa límite menor lo que se acerca más al resultado teórico calculado.

- El modelo *subgrid* de *WALE* es el más adecuado para la resolución de problemas relacionados con tuberías o conductos.
- Se obtiene la misma interpretación aplicando las dos funciones de postproceso, *Q - criterion* y *Lambda2*, por lo que ambos métodos son válidos para la localización de vórtices en un problema turbulento de características similares al desarrollado a lo largo del trabajo.
- Las componentes de la velocidad en los ejes *z* e *y* son despreciables a la salida del conducto al ser del orden de la unidad, mientras que en la estela del cuerpo de sección circular adquieren importancia.
- La velocidad en los ejes *z* e *y* va disminuyendo a lo largo del eje longitudinal del conducto, lo que favorece la laminación del flujo y la desaparición de las estructuras turbulentas a lo largo del conducto.

5.3. Trabajos futuros

El estudio realizado a lo largo de todo el trabajo representa una pequeña parte de lo que supone el estudio de la turbulencia a lo largo de un conducto de sección circular con distintos modelos *subgrid*, así como el análisis de los vórtices mediante funciones de postproceso del software OpenFOAM. Por ello se proponen una serie de proyectos que pueden ser desarrollados como complemento de este trabajo.

- **Simulación de las mismas geometrías con otros modelos subgrid para comparar sus resultados y ver su validez.** El presente trabajo utiliza los modelos *subgrid* de Smagorinsky, K equation y *WALE*, por lo que se propone la utilización de distintos modelos subgrid para comparar sus resultados tal y como se hace en este trabajo.
- **Estudio de distintos métodos de generar turbulencia dentro del conducto.** Para la generación de turbulencia en el presente trabajo se utiliza un cuerpo de sección cuadrada. Se propone la utilización de distintos cuerpos para comparar resultados y ver cuál es más eficiente para la obtención de turbulencia a lo largo del conducto.
- **Estudio estadístico de las soluciones.** Para la comprobación de la coherencia de la turbulencia.

Parte II

PLIEGO DE CONDICIONES

Capítulo 1

Condiciones generales.

1.1. General.

Cualquier puesto de trabajo en el que habitualmente y durante una parte relevante del trabajo se utilice un equipo con pantalla de visualización (ya sea un ordenador o vigilancia con pantallas) está sujeto a unos riesgos bien definidos y se deben prevenir. El trabajo con pantallas de visualización de datos es quizás el ejemplo más característico de cómo una nueva tecnología puede suponer la introducción de unos nuevos riesgos: problemas en los ojos y visión, posturales y lesiones por movimientos repetidos y estrés.

Para mitigar estos efectos, el *Real Decreto 488/1997 de 14 de abril* establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización donde se aplican las *disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales* [17].

Se debe prestar atención a cuatro variables principalmente para prever el tipo de riesgos que el trabajador puede encontrarse en la realización del proyecto:

- Tiempo de permanencia requerida ante la pantalla, el cual puede ser de manera continua o discontinua.
- Tiempo de trabajo con la pantalla de visualización.
- Exigencia y grado de complejidad de la tarea que el operario tiene que realizar ante la pantalla de visualización.
- Necesidad de obtener información de manera rápida y precisa.

Los factores generales a tener en cuenta para la prevención de riesgos laborales se describen en los siguientes puntos:

- Seguridad (debido a contactos eléctricos, caída o golpes en el puesto de trabajo).
- Higiene industrial (iluminación, ruido y condiciones termo-higrométricas, transmisiones de virus en el ambiente de trabajo o bacterias nocivas a través del

contacto en el teclado que podría acumular una gran cantidad de estas).

- Ergonomía (fatiga visual, picores, percepción borrosa, fatiga física y mental, ansiedad, irritabilidad o insomnio).

1.2. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril.

Artículo 1. Objeto.

1. El presente Real Decreto establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización.
2. Las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, se aplicarán plenamente al conjunto del ámbito contemplado en el apartado anterior.
3. Quedan excluidos del ámbito de aplicación de este Real Decreto:
 - a) Los puestos de conducción de vehículos o máquinas.
 - b) Los sistemas informáticos embarcados en un medio de transporte.
 - c) Los sistemas informáticos destinados prioritariamente a ser utilizados por el público.
 - d) Los sistemas llamados portátiles, siempre y cuando no se utilicen de modo continuado en un puesto de trabajo.
 - e) Las calculadoras, cajas registradoras y todos aquellos equipos que tengan un pequeño dispositivo de visualización de datos o medidas necesario para la utilización directa de dichos equipos.
 - f) Las máquinas de escribir de diseño clásico, conocidas como máquinas de ventanilla.

Artículo 2. Definiciones.

A efectos de este Real Decreto se entenderá por:

1. Pantalla de visualización: una pantalla alfanumérica o gráfica, independiente del método de representación visual utilizado.
2. Puesto de trabajo: el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona/máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato.
3. Trabajador: cualquier trabajador que habitualmente y durante una parte relevante de su trabajo normal utilice un equipo con pantalla de visualización.

Artículo 3. Obligaciones generales del empresario.

1. El empresario adoptará las medidas necesarias para que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización no suponga riesgos para su seguridad o salud o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo. En cualquier caso, los puestos de trabajo a que se refiere el presente Real Decreto deberán cumplir las disposiciones mínimas establecidas en el anexo del mismo.
2. A efectos de lo dispuesto en el primer párrafo del apartado anterior, el empresario deberá evaluar los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta en particular los posibles riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, así como el posible efecto añadido o combinado de los mismos.

La evaluación se realizará tomando en consideración las características propias del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea y entre éstas, especialmente, las siguientes:

- a) El tiempo promedio de utilización diaria del equipo.
 - b) El tiempo máximo de atención continua a la pantalla requerido por la tarea habitual.
 - c) El grado de atención que requiera dicha tarea.
3. Si la evaluación pone de manifiesto que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización supone o puede suponer un riesgo para su seguridad o salud, el empresario adoptará las medidas técnicas u organizativas necesarias para eliminar o reducir el riesgo al mínimo posible. En particular, deberá reducir la duración máxima del trabajo continuado en pantalla, organizando la actividad diaria de forma que esta tarea se alterne con otras o estableciendo las pausas necesarias cuando la alternancia de tareas no sea posible o no baste para disminuir el riesgo suficientemente.
4. En los convenios colectivos podrá acordarse la periodicidad, duración y condiciones de organización de los cambios de actividad y pausas a que se refiere el apartado anterior.

Artículo 4. Vigilancia de la salud.

1. El empresario garantizará el derecho de los trabajadores a una vigilancia adecuada de su salud, teniendo en cuenta en particular los riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, el posible efecto añadido o combinado de los mismos, y la eventual patología acompañante. Tal vigilancia será realizada por personal sanitario competente y según determinen las autoridades sanitarias en la pautas y protocolos que se elaboren, de conformidad con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 37 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención. Dicha vigilancia deberá ofrecerse a los trabajadores en las siguientes ocasiones:

- a) Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.
 - b) Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.
 - c) Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.
2. Cuando los resultados de la vigilancia de la salud a que se refiere el apartado 1 lo hiciese necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.
 3. El empresario proporcionará gratuitamente a los trabajadores dispositivos correctores especiales para la protección de la vista adecuados al trabajo con el equipo del que se trate, si los resultados de la vigilancia de la salud a los que se refieren los apartados anteriores demuestran su necesidad y no pueden utilizarse dispositivos correctores normales.

Artículo 5. Obligaciones en materia de información y formación.

1. De conformidad con los artículos 18 y 19 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, el empresario deberá garantizar que los trabajadores y los representantes de los trabajadores reciban una formación e información adecuadas sobre los riesgos derivados de la utilización de los equipos que incluyan pantallas de visualización, así como sobre las medidas de prevención y protección que hayan de adoptarse en aplicación del presente Real Decreto.
2. El empresario deberá informar a los trabajadores sobre todos los aspectos relacionados con la seguridad y la salud en su puesto de trabajo y sobre las medidas llevadas a cabo de conformidad con lo dispuesto en los artículos 3 y 4 de este Real Decreto.
3. El empresario deberá garantizar que cada trabajador reciba una formación adecuada sobre las modalidades de uso de los equipos con pantallas de visualización, antes de comenzar este tipo de trabajo y cada vez que la organización del puesto de trabajo se modifique de manera apreciable.

Artículo 6. Consulta y participación de los trabajadores.

La consulta y participación de los trabajadores o sus representantes sobre las cuestiones a que se refiere este Real Decreto se realizarán de conformidad con lo dispuesto en el apartado 2 del artículo 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Anexo.**■ Disposiciones mínimas**

Por todo lo dispuesto anteriormente, se va a definir el puesto de trabajo específico para la prevención de riesgos laborales y seguridad.

1. Equipo.**a) Observación general.**

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

b) Pantalla.

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones. La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos y otras formas de inestabilidad. El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno. La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario. Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla. La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

c) Teclado.

El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos. Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos. La superficie del teclado deberá ser mate para evitar reflejos. La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización. Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

d) Mesa o superficie de trabajo.

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorios. El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos para permitir a los trabajadores una posición óptima.

e) Asiento de trabajo.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable. La altura del mismo deberá ser regulable. El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable. Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

2. Entorno

a) Espacio.

El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.

b) Iluminación.

La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado. El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.

c) Reflejos y deslumbramientos.

Los puestos de trabajo deberán instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla. Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

d) Ruido.

El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

e) Calor.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

f) Emisiones.

Toda la radiación, excepto la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.

g) Humedad.

Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.

3. Interconexión ordenador/persona.

Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

- a)* El programa deberá estar adaptado a la tarea que deba realizarse.
- b)* El programa deberá de ser fácil de utilizar además de, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.
- c)* Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- d)* Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptado a los operadores.
- e)* Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

Capítulo 2

Condiciones de especificaciones técnicas.

Al ser este un proyecto principalmente de software de simulación, no requiere grandes dimensiones espaciales o equipos físicos complejos. Básicamente se necesita hardware, software (y su documentación, licencias, manuales, etc), conexión a internet, conocimientos previos de índole ingenieril, en concreto de fluidodinámica y métodos numéricos, cierta experiencia con equipos informáticos, acceso a material adicional relacionado con el tema para la mejor comprensión (tesis doctorales, proyectos previos, estudios similares, etc), y personal cualificado para la supervisión del mismo. A continuación se especifican en detalle los requisitos establecidos.

2.1. Especificaciones de materiales y equipos.

Hardware

El hardware deberá ser sofisticado para soportar cómodamente los procesos de cálculo que requiere este tipo de proyectos teniendo en cuenta los largos tiempos de simulación que son habituales. Debe garantizar la relativamente rápida convergencia de los casos lanzados en el mismo para poder tener holgura y hacer las pruebas necesarias para la correcta implementación del proyecto. Se ha utilizado un ordenador portátil y una estación de cálculo de 24 núcleos conectados a través del software MobaXTerm que usa protocolo SSH .

Software

Los programas utilizados para la elaboración de este proyecto han sido:

- OpenFOAM
- Matlab
- Paraview
- MobaXTerm con protocolo SSH

- Texmaker con MiKtex (versión de 64 bits)
- PDF reader
- Dropbox
- Línea de comandos en UNIX de LINUX
- Microsoft Excel
- Microsoft Powerpoint

Conexión a internet

Mantener una conexión estable a internet es un factor importante a tener en cuenta ya que al lanzar desde una conexión remota si la conexión a internet falla, también lo hace la conexión al ordenador *host* donde se ejecutan los casos y por lo tanto se interrumpe el cálculo.

La transferencia de archivos entre ambos ordenadores requiere una conexión a internet constante ya sea para la transferencia de grandes cantidades de archivos *output* generados en los cálculos a través de MobaXTerm o para archivos más pequeños como artículos o manuales.

También es necesaria dicha conexión para la continua búsqueda bibliográfica en internet, descarga de artículos, foros de ayuda, comunicación vía email con los miembros del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos implicados directa o indirectamente con el proyecto.

Conocimientos previos

Se necesita cierta formación enfocada a la ingeniería: termofluidodinámica, turbulencia, métodos numéricos, modelado, etc.

Se recomienda tener predisposición, cierta autonomía, capacidad analítica y de síntesis, paciencia y perseverancia.

Conocimientos informáticos

En el ámbito de la simulación es necesario estar familiarizado con ciertas herramientas que ayudarán a cumplir los objetivos y a solventar problemas de manera más rápida y eficiente. El total desconocimiento de los programas informáticos arriba mencionados puede causar un desarrollo lento y tedioso del proyecto dado el nivel de exigencia que entraña. Se recomienda un aprendizaje concurrente y un proceder multitarea para no generar cuellos de botella.

Material adicional

Se necesita acceso a documentos específicos del tema a tratar debido a la complejidad del mismo. Se recomienda que el usuario tenga conocimientos de otros idiomas, principalmente inglés ya que gran parte de este material se encontrará escrito en esta lengua. Manejar la bibliografía con cierta soltura será un factor clave para el avance del proyecto.

Supervisión

El supervisor encargado de la dirección del proyecto deberá tener experiencia demostrada y contrastada en la ejecución de proyectos de estudio CFD. Además, un porcentaje importante (al menos 90 %) de dichos proyectos deberán haber sido llevados a cabo de forma satisfactoria tanto en lo que se refiere a plazos, presupuesto, cumplimiento de las especificaciones y aceptación por parte del cliente.

2.2. Condiciones de calidad.

La empresa encargada de la realización del proyecto ha de poder garantizar la calidad del producto final. Por este motivo, se tendrá en cuenta la calidad de los proyectos realizados por dicha empresa en ocasiones anteriores. En particular, se valorará que la empresa disponga del certificado de calidad ISO-9001. La empresa deberá realizar pruebas intermedias a lo largo del proceso de desarrollo del proyecto. Durante la programación se probarán cada una de las funciones o rutinas, para depurar errores de codificación. Después se realizarán pruebas para comprobar que cumplen las funciones previstas. Finalmente, se desarrollarán pruebas de aceptación con el sistema completamente integrado. Tanto el sistema de calidad de la empresa como el proceso de pruebas y sus resultados deberán estar debidamente documentados. Particularmente, se deberá presentar un registro impreso en el que se recojan las pruebas llevadas a cabo, indicando título de la prueba, descripción, entorno y fecha de realización, resultados y valoraciones o comentarios.

2.3. Condiciones de garantía y mantenimiento.

La empresa contratada para la realización del proyecto garantiza durante el período de dos años el producto final, de tal forma que se compromete a solventar cualquier problema surgido en el uso cotidiano de éste, así como de ofrecer un servicio de ayuda sobre el manejo del mismo. El plazo de garantía comenzará a ser efectivo desde el momento de la recepción provisional del sistema. La garantía quedará invalidada en el caso que no se hayan seguido las pautas de uso que se indican en las instrucciones del mismo, así también como las condiciones que se deben cumplir para que la garantía sea válida.

En el caso del presente producto no hará falta un mantenimiento específico para su uso. Solo un uso adecuado evitando los riesgos explicados en el tutorial de la garantía solventa el buen funcionamiento del mismo.

2.4. Reclamaciones.

Solo se atenderán las reclamaciones formuladas por escrito en un plazo de quince días hábiles a partir del momento de la entrega de la herramienta al contratista. El

plazo anteriormente citado se prolongará por espacio de un mes en el caso de que la entrega se realice fuera de España. En el caso de que alguna de las mercancías entregadas resulte defectuosa el vendedor únicamente se compromete a la sustitución de las mismas declinando así cualquier otra responsabilidad. Ante envíos equivocados o la ausencia de los mismos, el vendedor de la misma manera únicamente se compromete al suministro de la mercancía estipulada en las condiciones establecidas por el cliente, siendo ajeno a cualquier otra responsabilidad.

2.5. Condiciones legales y contractuales.

En el hipotético caso de que durante la ejecución del proyecto, el comprador quiera extender el contrato a otros suministros, estos serían objeto de nuevo presupuesto. En el caso de modificaciones, variaciones y otras causas que implicasen la suspensión temporal del suministro o retraso en el período de entrega, se podrá solicitar una prórroga equivalente del término del ejecutivo contractual, a condición de que adelante tal solicitud antes de que el término haya caducado. Los aumentos o disminuciones que en el suministro tuvieran que verificarse serían valorados sobre la base de los precios vigentes.

2.6. Revisión de los precios.

Los precios que se muestran en el presupuesto son fijos e invariables, cualesquiera que sean las variaciones del coste de los materiales o mano de obra.

2.7. Fianza.

El contratista se compromete a obtener aval bancario a favor del comprador, en concepto de fianza por el 10 % del valor total del contrato, para responder del cumplimiento de todas y cada una de las obligaciones previstas en el mismo. Dicho aval deberá mantenerse desde el inicio del trabajo hasta el término del periodo de garantía. La fianza será devuelta al contratista una vez firmada la recepción definitiva de la aplicación.

2.8. Aceptación.

La aceptación, referida a los puntos objeto de la presente compraventa, será cumplida mediante el uso de procedimientos de prueba, o programas establecidos por el vendedor. Cuando la obligación de instalación corresponda al vendedor, como es el caso, por estar incluido este servicio el precio de los productos, la aceptación se producirá

en el lugar de la instalación al demostrar el vendedor que, tanto los procedimientos de diagnóstico como los de prueba funcionan correctamente o que, resulta probado que el producto se encuentra en condiciones normales de funcionamiento. Si la instalación fuese programada o demorada por el comprador mas de treinta días con posterioridad a la fecha de entrega, entonces el vendedor considerará que los productos han sido aceptados con efectividad del trigésimo primer día, contado a partir de la fecha de entrega.

Parte III

PRESUPUESTO

Capítulo 1

Presupuesto

En esta parte del trabajo se muestran los costes de la realización del presente Trabajo Final de Grado “ LARGE EDDY SIMULATION DE FLUJO CONFINADO ENTRE PAREDES”. A lo largo de este capítulo se presentan los gastos de material, software, personal y de oficina. Los precios aplicados a los grupos de coste corresponden a las tarifas legales vigentes o, en caso de no existir, estimaciones coherentes. El trabajo realizado en este proyecto está destinado a investigaciones internas del DMMT, por lo que no es necesario incluir el IVA (Impuesto de Valor Añadido). Aun así, se mostrará una sección incluyendo los gastos generales, beneficio económico e IVA.

El coste de amortización se calcula como:

$$a = \frac{VC - VR}{n} \quad (1.1)$$

$$t_h = \frac{a}{h} \quad (1.2)$$

Donde cada variable corresponde con lo siguiente:

- a : amortización en euros/año
- VC : valor de compra, en euros
- VR : valor residual al cabo del periodo de amortización, en euros
- n : periodo de amortización, en años
- t_h : tasa horaria, en euros/hora
- h : horas trabajadas al año

Los precios unitarios correspondientes al personal se calculan como:

$$\frac{\text{horastrabajadas}}{\text{año}} = \left(\frac{\text{sem}}{\text{año}} - \frac{\text{sem}_{\text{vacaciones/festivos}}}{\text{año}} \right) \frac{\text{horastrabajadas}}{\text{sem}} \quad (1.3)$$

1.1. Costes a tener en cuenta

En este apartado se definen los recursos a tener en cuenta, los cuales han sido necesarios para la realización del presente Trabajo Final de Grado:

- Conjunto de equipos informáticos y software

Descripción	Unidades
Ordenador portátil HP OMEN 17-W203ns I7-7700HQ	1
Estación de cálculo	1
Ratón convencional	1
Licencia Matlab	1
Licencia Microsoft Office 2016	1
Licencia OpenFOAM	1

- Montaje e instalación del equipo informático

Descripción	Unidades
Ordenador portátil HP	1
Estación de cálculo	1
Técnico informático	1

- Instalación de software específico

Descripción	Unidades
Matlab	1
Microsoft Office 2016	1
OpenFOAM	1
Técnico informático	1

- Personal específico para el desarrollo del proyecto

Descripción	Unidades
Becario	1
Doctor Ingeniero	1

- Alquiler de una oficina para la ubicación de los elementos y desarrollo del proyecto

Descripción	Unidades
Oficina	1
Permisos de oficina	1
Seguros de oficina	1

- Material de Oficina

Descripción	Unidades
Ratón convencional	1
Libreta de apuntes	1
Lápices y bolígrafos	1
fólios	1

1.2. Desglose de costes unitarios

1.2.1. Coste de material y software unitario

- Equipo informático
 - Portátil. Se estima un valor residual del 20 % y un periodo de amortización de 5 años.

$$a = \frac{1239 - 248}{5} = 198,2 \quad (1.4)$$

$$t_h = \frac{198,2}{1840} = 0,108 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (1.5)$$

- Ratón convencional. Se ha estimado un valor de 10 euros por unidad.
- Estación de cálculo. El valor residual estimado es del 20 % y el periodo de amortización es de 8 años.

$$a = \frac{3000 - 600}{8} = 300 \quad (1.6)$$

- Software. El coste anual de los software se consideran amortizados en ese año de licencia sin valor residual.
 - Licencia Matlab. El valor de una licencia estándar anual es de 1.523 euros.

$$t_h = \frac{1523}{1840} = 0,83 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (1.7)$$

- Licencia Microsoft Office. El valor de una licencia estándar anual es de 115 euros.

$$t_h = \frac{115}{1840} = 0,0625 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (1.8)$$

- Licencia OpenFOAM. Al ser un programa de código libre no implica ningún coste.

1.2.2. Coste de personal cualificado unitario

- Coste de becario. Suponiendo que el trabajo se realiza en calidad de becario en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia con un contrato de duración de 3 meses, se obtiene el siguiente coste asociado al mismo.

$$\text{Salario bruto mensual} = 420 \frac{\text{euros}}{\text{mes}} \quad (1.9)$$

$$4 \frac{\text{semana}}{\text{mes}} * 40 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} = 160 \frac{\text{horas}}{\text{mes}} \quad (1.10)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{420}{160} = 2,63 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (1.11)$$

- Coste asociado al Doctor Ingeniero. Se ha estimado en base al estudio realizado por la Universidad Politécnica de Valencia sobre complementos retributivos automáticos y a los méritos de investigación.

$$\text{Salario bruto anual} = 32000 \frac{\text{euros}}{\text{año}} \quad (1.12)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{32000}{1840} = 17,39 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (1.13)$$

- Coste asociado al técnico informático.

$$\text{Salario bruto anual} = 24000 \frac{\text{euros}}{\text{año}} \quad (1.14)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{18000}{1840} = 13,04 \frac{\text{euros}}{\text{hora}} \quad (1.15)$$

1.2.3. Coste de oficina unitario

El lugar en el que se desarrolla el trabajo está ubicado en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, en la Universitat Politècnica de València. El coste de alquiler de la oficina se ha estimado en base a la media de alquiler de oficinas de la ciudad de Valencia con un valor de 1000 euros. Además, los costes se dividen entre 4 personas que la ocupan ajenas al proyecto.:

$$\text{Coste mensual oficina} = \frac{1000}{4} = 250 \frac{\text{euros}}{\text{mes}} \quad (1.16)$$

$$\text{Coste total} = 250 \frac{\text{euros}}{\text{mes}} * 3 \text{ meses} = 750 \text{ euros} \quad (1.17)$$

Los costes incluyen permisos, gastos de luz, agua, calefacción y seguro correspondiente.

1.2.4. Coste de material de oficina

Dentro de estos costes se incluyen materiales de oficina necesarios para la realización del estudio.

- Libreta para apuntes (3,5 euros)
- Lápices y bolígrafos (5 euros)
- Paquete de folios (3 euros)
- Disco duro externo 2 TB (95 euros)

1.3. Presupuesto total

Seguidamente se adjuntan dos tablas estimadas oportunas para la definición del presupuesto del proyecto. Dicho presupuesto presenta una apariencia reducida, dadas las características del trabajo. Las partes que presenta son las siguientes: el cuadro de precios simples, el cuadro de precios descompuestos, el resumen del presupuesto por capítulos y el presupuesto final.

Descripción del recurso	Cantidad	Precio	Importe
Mano de obra			
Técnico informático	4	13,04	52,16
Becario	300	2,63	789,00
Doctor	40	17,391	695,64
		Total	1536,8 €
Maquinaria			
Ordenador portátil	300	0,108	32,4
Estación de cálculo	700	0,163	114,1
		Total	146,5 €
Material			
Disco duro externo 2 TB	1	95	95
Material de oficina	1	11,5	11,5
Licencia Matlab	50	0,83	41,5
Licencia OpenFOAM	0	0	0
Licencia Microsoft Office	180	0,0625	11,25
		Total	159,25 €
Medio auxiliar			
Alquiler oficina	300	4,17	750
		Total	750 €
Total recursos			2592,55 €

Tabla 1.1: Presupuesto desglosado.

El coste total del trabajo añadiendo el IVA apliado es el siguiente.

TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	2592,55 €
13 % Gastos Generales	337,03
6 % Beneficio Industrial	155,55
TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA	3085,13 €
21 % IVA	647,88
TOTAL EJECUCIÓN PRESUPUESTO C/IVA	3733,02 €

Tabla 1.2: Presupuesto total con IVA.

El presupuesto proyectado asciende a la cantidad de:

TRES MIL SETECIENTOS TREINTA Y TRES EUROS CON DOS CÉNTIMOS

Bibliografía

- [1] CENTRO DE MOTORES TÉRMICOS (CMT) main official webpage, “<http://www.cmt.upv.es/>”.
- [2] M. SALINAS-VÁZQUEZ, W. VICENTE-RODRIGUEZ, E. CHOL-OREA Y V. LEYVA GARCÍA. *Simulación de la turbulencia de un flujo que pasa alrededor de un cilindro de sección cuadrada a partir de la utilización de la simulación de grandes escalas y de fronteras inmersas.*
- [3] GUILLERMO PALAU SALVADOR *Estructuras en canales abiertos con vegetación rígida mediante Large Eddy Simulation*
- [4] ANDRÉS L. GRANADOS M. *Simulación con "LES" del flujo turbulento en una tubería rugosa*
- [5] J. ANDERSON, E. DICK, G. DEGREZ, R. GRUNDMANN, J. DEGROOTE, J. VIERENDEELS *Computational Fluid Dynamics an introduction*
- [6] GARY N. COLEMAN AND RICHARD D. SANDBERG *A Primer on Direct Numerical Simulation of Turbulence - Methods, Procedures and Guidelines*
- [7] F. W. SCHMIDT Y B. ZELDIN *Laminar FLOW in Inlet Sections of Tubes and Ducts*
- [8] SHAH R. K. Y A. L. LONDON *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*
- [9] M. RODRIGUEZ *Capa límite laminar incompresible. Soluciones de semejanza*
- [10] FRANK M. WHITE *Viscous fluid flow*
- [11] THE OPENFOAM FOUNDATION *OpenFOAM User Guide version 5.0. 2017*
- [12] FUYIMA NOZAKI *Smagorinsky SGS model in OpenFOAM*
- [13] FUYIMA NOZAKI *WALE SGS model in OpenFOAM*
- [14] F. NICOUD Y F. DUCROS *Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor*
- [15] FUYIMA NOZAKI *One equation eddy-viscosity SGS model in OpenFOAM*
- [16] SCHLICHTING, H *Boundary-Layer Theory. McGraw-Hill, New York, 83-89.*

- [17] Real Decreto 488/1997 de 14 de abril sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización. ” <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1997-8671> ‘ ‘